

集成材(GLT)應用於複合構造之接合部防火性能評估及設計方法建立

內政部建築研究所業務委託研究報告

中華民國 112 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

集成材(GLT)應用於複合構造之接合部防火性能 評估及設計方法建立

受委託單位： 國立成功大學
研究主持人： 鍾育霖副教授
共同主持人： 郭耕杖助理教授
研究助理： 林彥廷、劉立群
研究期程： 中華民國 112 年 3 月至 112 年 12 月
研究經費： 新臺幣 258 萬元

內政部建築研究所業務委託研究報告

中華民國 112 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

目次

目次	I
表次	III
圖次	V
摘要	VII
ABSTRACT	XI
第一章 緒論	1
第一節 研究緣起與背景	1
第二節 研究目的	5
第三節 研究方法	6
第二章 文獻回顧	9
第一節 國內外木結構接合部防火規定	9
第二節 接合部耐火試驗研究	12
第三章 接合部耐火實驗	15
第一節 試體設計	15
第二節 實驗規劃	18
第三節 試體準備與製作	21
第四節 試驗結果與分析	24
第五節 炭化深度與速率	31
第四章 接合部結構實驗	37
第一節 接合部結構試驗規劃與設計	37
第二節 試驗結果與接合部剩餘強度	38
第五章 結論與建議	45
附錄一 期初審查會議記錄	47
附錄二 專家會議記錄	51
附錄三 期中期末審查會議記錄	55
附錄四 接合部設計資料	63
參考書目	69

表次

表 1-1 研究進度規劃表	9
表 2-1 無保護扣件耐火時效以及要求尺寸	10
表 2-2 炭化深度與炭化速度	14
表 3-1 實驗試體以及參數表	15
表 3-2 CW 試體各位置炭化深度及炭化速率量測結果	32
表 3-3 CS_1 試體各位置炭化深度及炭化速率量測結果	33
表 3-4 PS_3 試體各位置炭化深度及炭化速率量測結果	34
表 3-5 PS_C3 試體各位置炭化深度及炭化速率量測結果	35
表 3-6 摩擦栓周邊碳化直徑	36
表 4-1 結構實驗試體以及參數表	37
表 4-2 火害接合部剩餘強度	39
表 4-3 火害接合部各參數及評估強度	41
表 4-4 接合部結構性能整理	43

圖次

圖 1-1 系複合結構統	2
圖 1-2 不同系統之梁柱接合部示意圖	3
圖 1-3 木構梁柱接頭彎矩與轉角關係	3
圖 1-4 使用金屬扣件接合部火害試驗結果	4
圖 1-5 鋼柱-集成材梁接合部及扣件防火遮蓋之水平剖面示意圖	6
圖 1-6 梁柱接頭耐火試驗示意圖	6
圖 1-7 梁柱接頭抗彎試驗示意圖	7
圖 2-1 梁柱接合部耐火遮蓋案例	10
圖 2-2 螺栓接合部保護方式	11
圖 2-3 鋼板邊緣保護形式	11
圖 2-4 鋼柱木梁耐火試驗試體	12
圖 2-5 鋼板接合件溫度變化	12
圖 2-6 各組試體斷面形式以及實驗後炭化範圍	13
圖 2-7 接合部耐火試驗試體及實驗裝置	13
圖 2-8 柱、梁以及接合部剖面	13
圖 2-9 試體	14
圖 3-1 第一組試體接合部圖	16
圖 3-2 第二組鋼柱柳杉梁試體	16
圖 3-3 第三組鋼柱花旗松梁試體	16
圖 3-4 第四組鋼柱花旗松梁且有遮蓋之試體	17
圖 3-5 第一組試體安裝圖	17
圖 3-6 第二至第四組試體安裝圖	17
圖 3-7 建築研究所防火實驗室大型柱梁爐	18
圖 3-8 試體與爐蓋、反力框架組裝圖	18
圖 3-9 試體安裝於爐內時整體實驗系統圖	19
圖 3-10 第一組試體量測位置	20
圖 3-11 第二組試體量測位置	20
圖 3-12 鋼管柱安裝電熱偶情形	21
圖 3-13 鋼柱連接板安裝熱電偶情形	21
圖 3-14 木梁熱電偶安裝完測試情形	21
圖 3-15 輕質混凝土樓板供千斤頂在梁上方施力開口	22
圖 3-16 第一組試體與底座鋼梁以及側邊鋼梁接續後情形	22
圖 3-17 第二組試體與爐蓋、反力框架組合後吊裝情形	22
圖 3-18 試體安裝於柱爐後側邊開口的封裝情形	23
圖 3-19 柱爐上方爐蓋開口處作業情形	23
圖 3-20 第一組試體耐火試驗後吊出情形	24
圖 3-21 第一組試體(CW)火害前後照片	24

圖 3-22 接合部火害前後照片	25
圖 3-23 接合部下緣開口處火害前後照片	25
圖 3-24 接合部及木梁側面照片	25
圖 3-25 爐內平均溫度與梁中央斷面溫度變化	26
圖 3-26 連接件表面溫度變化	26
圖 3-27 梁中心點撓度變化	26
圖 3-28 第二組試體(CS_1)試體組裝完成照片	27
圖 3-29 試體火害後照片	27
圖 3-30 爐內溫度與木梁斷面溫度變化	28
圖 3-31 爐內溫度與鋼柱內部溫度變化	28
圖 3-32 爐內溫度與連接件表面溫度變化	28
圖 3-33 木梁中心撓度變化	28
圖 3-34 試體火害後照片	29
圖 3-35 爐內溫度與木梁斷面溫度變化	29
圖 3-36 爐內溫度與鋼柱內部溫度變化	29
圖 3-37 爐內溫度與連接件表面溫度變化	29
圖 3-38 木梁中心撓度變化	29
圖 3-39 試體火害後照片	30
圖 3-40 爐內溫度與木梁斷面溫度變化	30
圖 3-41 爐內溫度與鋼柱內部溫度變化	30
圖 3-42 爐內溫度與連接件表面溫度變化	30
圖 3-43 試木梁中心撓度變化	30
圖 3-44 梁橫切面位置	31
圖 3-45 切面梁側炭化深度位置	31
圖 3-46 CW 試體切面炭化深度	32
圖 3-47 CS_1 試體切面炭化深度	33
圖 3-48 PS_3 試體切面炭化深度	34
圖 3-49 PS_C3 試體切面炭化深度	35
圖 3-50 接合部側邊及底邊炭化深度整理	36
圖 4-1 成大建築系結構實驗場	37
圖 4-2 試驗體以及加載系統	37
圖 4-3 火害接合部側推試驗結果	38
圖 4-4 CS_1 試體試驗破壞照片	39
圖 4-5 梁斷面參數	40
圖 4-6 接合部彎矩計算示意圖	41
圖 4-7 CW_S 試體實驗照片與力量-變形遲滯迴圈	42
圖 4-8 PS_3 試體實驗照片與力量-變形遲滯迴圈	42
圖 4-9 PS_CS 試體實驗照片與力量 -變形遲滯迴圈	43

摘要

關鍵字：集成材接合部、複合構造、防火性能、炭化深度

一、研究緣起

木造建築的推廣有利降低建築工程產業的碳排放量，而木結構耐火性能在推廣應用中是注目的焦點之一，特別國內在設計上偏好將木構材露出而非以耐火裝修材料遮蓋，因此對於建築耐火性能的掌握尤其重要，大斷面的集成材可透過木材的炭化速率評估規定耐火時效後剩餘的有效斷面是否滿足結構荷載安全需求，藉此決定斷面尺寸，而接合部由於透過金屬扣件以及連接件相互接合，斷面因鑽孔、開槽等導致有效面積相對梁斷面減少許多，且由於現場施工考量，金屬扣件如金屬摩擦栓或螺栓與木材間留有空隙，可能成為環境高溫竄入木材內側的通路，或者透過金屬扣件將高溫傳遞至木材內側，可能使得斷面炭化區域增加，接頭結構性能下降。國內外木構造建築物設計的防火相關規定均明定，接合部金屬扣件應使用適當之防火被覆材或將金屬扣件設置於規定防火時效之安全斷面內，以確保接合部之強度，而由於此設計將減少接頭金屬扣件的有效承載長度，影響強度以及韌性，同時施工上比較複雜，實務上許多設計仍維持金屬扣件外露的方式，而扣件外露或使用遮蓋的接合形式目前並沒有國內火害實驗資料提供設計參考，除此之外，複合結構因為可以適應國內氣候條件對於結構性能、施工性也有所提升的緣故，不少案例採用混凝土木構或是鋼構木構的複合結構型式，鋼結構柱與集成材梁結合的複合結構系統有優良的施工性以及結構性能，在耐火方面，鋼柱的耐火性能要求與木材卻不相同，鋼構表面施作具一小時耐火性能披覆時，鋼材表面溫度可能超過 400 度(不可超過 500 度)，此標準下位於木接頭內部鋼板連接件的高溫可能引起木材燃燒或熱分解，因此在木材耐火時效內應抑制鋼材表面溫度至 260 度以下方能抑制周邊木材的炭化，如此對於鋼結構柱可能需要更高的耐火時效，對此疑慮目前尚無實驗直接證實，目前針對鋼柱與集成材梁複合結構中鋼材對應的防火披覆厚度等也尚未有相關的量化研究成果供實務界參考。

二、研究方法及過程

以集成材接合部耐火試驗以及集成材接合部結構試驗分別驗證耐火性能以及接合部力學性能，試體包含純木構的集成材接合部以及鋼柱集成材樑接合部等共四組試體，包含日本柳杉以及花旗松等常用材種，分別以不做任何防護、鋼柱採 1 小時或 3 小時防火漆噴塗以及將扣件以及開口處採木材遮蓋等方式處理，試驗在固定荷重加載下，以 1 小時耐火試驗評估梁斷面以及接合部斷面在梁幅及梁深方向上的炭化速度、炭化深度、有效剩餘斷面以及各種耐火措施下的

性能。而結構試驗則將火害試驗後的試體進行靜態測推試驗，並準備三組對照的健全接合部試體，以靜態反覆加載方式分別測試剩餘強度以及健全時的強度，以評估火害後剩餘強度，並作為剩餘強度評估方式的參考依據。

三、重要發現

1. 集成材梁柱的純木構接合部試體採用目前業界常見的接合形式，由於在梁下端留有較大開口，試驗中高溫竄入接合部內側，使得木梁側邊的保護層完全炭化，同時木梁內部摩擦栓周邊木材也因傳導的高溫而炭化，而接合部底部的炭化範圍與最底側摩擦栓周邊炭化區域串連，使得此處炭化深度超過 10 公分，達規範的炭化深度兩倍，使得最下層摩擦栓失去承载力，炭化情形在四組試體中最为嚴重。
2. 兩組鋼柱集成材樑接合部試體的炭化區域相近，同樣在摩擦栓孔有炭化現象，在接合部剩餘強度試驗中，與純粹木構接合試體相同在力量加載初期產生位移滑移但力量仍維持為零的現象，接合部在此階段呈現鉸接的行為。此外，若鋼柱表面採用 3 小時防火漆取代 1 小時防火漆噴塗，能夠將梁內側剪力鋼板表面溫度自 400 度左右降低至約 200 度，此時樑內側與剪力鋼板接觸之木材則未發生炭化。
3. 在摩擦栓外側以及梁底部開槽處以兩公分厚木塞遮蓋試體的火害實驗結果顯示，梁內摩擦栓周圍幾乎未發生炭化，同時梁下緣炭化深度也受到抑制，木材遮蓋能夠大幅降低接合部炭化面積。
4. 各組試體在接合部的炭化深度與速率都比梁斷面高，第一、二組日本柳杉接合部底邊炭化深度約為標準值兩倍。花旗松未遮蓋接合部試體側邊及底邊分別比規範值大 17 及 24%，有遮蓋時則略降為 10 及 18%。
5. 未做遮蓋的第一組及第三組試體火害後接合部的強度約為對應的健全試體的 3 成，而有遮蓋試體剩餘強度接近 6 成，勁度亦呈現相同趨勢，無遮蓋試體剩餘勁度約為 13~16%，而有遮蓋試體仍有 67% 以上，有遮蓋的接合部剩餘結構性能明顯高出許多，可見接合部鐵件的遮蓋有無不僅顯著影響接合部區域的炭化範圍，也保留較高的結構性能。
6. 接合部剩餘強度計算應扣除表層炭化深度，同時也需視現況評估最底側金屬扣件底部的木梁炭化情形，決定該處扣件能否提供預期強度，而本研究提出的計算結果大致於實驗結果的降伏強度相近，但低於最大強度，計算結果偏向保守。

四、主要建議事項

建議一：

木構造建築物設計及施工規範第九章增加接合部耐火設計內容：立即可行建議

主辦單位：內政部建築研究所

協辦單位：內政部國土管理署

本研究的成果顯示接合部的五金扣件以及開口處做遮蓋能夠有效降低炭化的深度及範圍，同時也對維持火害後剩餘強度有顯著幫助，可在木構造建築物設計及施工規範之第九章增加接合部防火設計的小節，補充接合部施做耐火遮蓋的成效、耐火設計的方式、增列建議作法及圖例。後續規劃於明年度執行直交集成板(CLT)樓板與牆板接合部之防火性能評估。

建議二：

建議透過實驗研究補足接合部耐火設計相關參數：立即可行建議

主辦單位：內政部建築研究所

協辦單位：內政部國土管理署

由於接合部種類多元，且未來有木結構高層化的需求，接合部適合採用的遮蓋厚度、尺寸及施作方式等依各別案例將有所不同，建議透過系統化的實驗研究，獲得供耐火設計使用的可靠數值，相關量化成果可增列於木構造建築物設計及施工規範之第九章。

建議三：

建議投入火害後修復與性能補強之技術研究：中長期建議

主辦單位：內政部建築研究所

協辦單位：內政部國土管理署

透過本研究的實驗成果可知火害會顯著降低接合部的強度與勁度，目前國內木造建築數量逐年增加，加上未來木造建築高層化趨勢，對於火害後修復與性能補強之相關技術有更迫切需求，因此本研究團隊建議先收集國內外相關文獻，同時以實驗研究方式評估各種技術的性能並且得到量化成果供實務使用，亦可將相關的木造建築火害修復補強技術成果編輯出版。

Abstract

Keywords: Connection, Hybrid timber structure, Fire resistance performance, Charring depth

1. Background

Applying engineering timber products could effectively reduce the Carbon emission in the construction industry. Fire resistance performance of timber structure has been a concerned issue in the promotion of using engineering timber products. In Taiwan, instead of cover the timber with the fire resisting gypsum board, designers and owners prefer to have the uncovered timber surface for the nature interior atmosphere. In the fire resisting design, massive timber member can increase the section dimension to reach the desire fire rate. For the connection, due to the section reduction by the predrilled dowel holes and the slits for accommodate shear plate heat tends to be transported into the timber through these process if they are not covered. This may lead to large charring area and depth than expectation and cause a notable reduce in resistance and stiffness. In addition, owing to the climate condition and environment in Taiwan, hybrid timber structures such as concrete-timber or steel-timber structure who have better weather resistance and structural performance are more acceptable and popular in the market. Steel column- glued laminated timber beam system features of light weight, and higher lateral resistance than conventional timber structure. The steel columns can be recycled after the life circle of the building. Also, the dry construction in field also make it becoming popular in the practice. For the fire safety of its connection, the column have to cover with fire painting with one hour fire resisting capacity for a building lower than 12m height in Taiwan. However, the temperature of the steel surface is allowed to reach 400 degree. The high temperature may be transferred to the shear plate inserted in the timber beam of the connection area and induce wood pyrolysis of the neighboring timber. This may cause higher fire painting thickness requirement for reducing the steel surface temperature.

2. Research Method

One hour fire tests following the CNS 12514-1 test standard and static loading tests are planned to evaluate the fire resisting capacity and residual strength of the connections. Four full-scale timber

connection specimens were prepared for the fire test. One is glued laminated timber beam-column connection, and three are square tube section steel column- glued laminated timber beam connections. Timber beam made of *Cryptomeria japonica* and *Pseudotsuga menziesii* which are common used material in market are prepared. Steel column with one hour painting and three hour painting thicknesses, timber covers for the dowel and slit at the connection are applied at individual specimen to evaluate their performance. After the fire tests, connection specimen were monotonically loaded up to find the ultimate strengths. Also, three new counterpart connections were also prepared and cyclically tested to make a comparison with the fired specimen. The charring area, depth and residual strengths of the connection are recorded to evaluate the fire resistance of the connections.

3. Important Finding

- (1) For the glued laminated column-beam connection, the heat was transported into the beam through the uncovered slit and dowels. The wood surrounding the dowel was charred, and the area since the bottom of the beam extended to the bottom dowels and generated charred depth of about 10cm which was about two times of the design value. The connection exhibit the most serious charring area in the specimens.
- (2) The steel column-timber beam connections show similar result. The wood surrounding the dowel hole was also charred. The monotonic load tests of the fired connections show some slips at beginning of the loading which means the connection perform as a hinge under small deformation range. The temperature at the surface of the shear plate was reduced to 200 degree from 400 degree when the 3hour fire painting was applied. Then the wood near the plate was not charred.
- (3) When the 2cm thickness wood covers were applied at the outer ends of the dowels and the slit, the dowel hole was not charred and the charring depth at bottom of the beam was notably reduced.
- (4) The four specimens all exhibit larger charring depths than those of their beam sections, especially for the specimens using *Cryptomeria japonica* beams. The bottom charring depth reaches two times of the design value. For the connection with wood covers, the charring depth at the lateral side and bottom side of beam at connection is about 10% and 18% larger than the design value.

- (5) The residual strengths of the uncovered specimens were only about 30% of that of the healthy counterpart connections. However, the strength of the specimen with wood covering exhibited about 67% of that of its counterpart. The wood covering not only reduces the charring are and depth but maintaining the higher residual resistance.
- (6) For evaluating the residual strength of the connection, the charred depth should be deducted in the calculation. The equations proposed in the report show generally reasonable and conservative results comparing with the test results.

4. Main Suggestions

Suggestion 1

Increase connection fire design section in the chapter 9 of the timber design code.

Organizer: Architecture and Building Research Institute of the Ministry of the Interior.

Co-organizer: National Land Management Agency, MOI.

The test results have shown that the wood covering not only reduces the charring depth but contributes to maintain the higher residual resistance which presents notable improvement than that of without covering. It is suggested to put more discriptions of fire safety design, research results and recommended application examples the chapter 9 of the timber design code.

Suggestion 2

Establish connection fire design paremeter data base.

Organizer: Architecture and Building Research Institute of the Ministry of the Interior.

Co-organizer: National Land Management Agency, MOI.

Timber connection has different types and details depending on various performance requirements and structure systems. Several paramenters such as the cover thickness, dimensions and application methods and so on should be quantified and organized for the fire design use. These need systematic experiments to establish data base.

Suggestion 3

Study on post-fire repair and retrofitting technologies for timber buildings

Organizer: Architecture and Building Research Institute of the Ministry of the Interior.

Co-organizer: National Land Management Agency, MOI.

The test results have shown that fire would significantly reduce the structure performance of the connection. Therefore the post-fire repair and retrofitting technologies would be needed for the timber building. The research team suggests that the related research achievements and references could be collected. And post-fire capacity evaluating method, and repair-retrofit methods should be developed through experimental approach.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

氣候變遷以及全球暖化的議題是這 30 年來國際間持續重視的問題，不僅是地球環境，各國的政策及經濟層面都接受到深遠的影響。我國為回應國際間對於環境議題的要求，啟動了「溫管法」修法，修改為「氣候變遷因應法」，將國家長期減量目標修改為 2050 年達到溫室氣體淨零排放。多元有效益的利用木竹材料，對於淨零減碳的貢獻涵蓋了林木生長所吸收之 CO_2 ，以及木材加工時能源消耗較低之材料替代效果，亦即使用木材相對於其他使用高碳排製造之工程材料有顯著的 CO_2 減量貢獻。以鄰近的日本為例，其木材產業發達且育林政策完善，90% 的住宅使用木造建材，天野耕二(2004)的研究指出[1]，2000 年開工的建築物中，使用木材所吸收的 CO_2 達到 379 萬噸，恒次祐子 (2017) 研究指出[2]，若以木造住宅、木製家具使用率達 70%，以及土木構造使用達 600 萬 m^3 年計，則會有 230 萬噸碳/年的吸收量，此相當於日本削減目標 2.7%，森林吸收目標之 30%。國際能源總署 (IEA) 解析目前全球碳排主要來自建築產業，2020 年更有高達 37% 的碳排放來自住宅、建築業等直接或非直接的碳排放，因此積極地應用木建材，不僅有碳儲藏之效果，更有削減碳排放的效益。在淨零建築與推廣應用上，可將目標應聚焦於增加建築產業中木竹製工程材料的使用，透過木竹構件以及構造能夠有效固碳於建築內之特性，可降低建築產業之碳排放量，達到淨零碳排的目標，相對於國內 90% 以上的建築都是鋼筋混凝土的相關構造，木竹材構造不論是在環境友善、材料性能、工法等面向上都比鋼筋混凝土構造有顯著的優勢，也能透過預製構件及乾式施工等方式減少工期和生產能耗，一直以來是國際間各先進國家建築產業高度使用的建築材料之一，近年更因環境議題的重視，許多中、高層建築逐漸採用工程木材。

集成材(Glued-laminated timber, GLT)為國內市場常見也是目前市面上應用最廣的工程木材，構築形式多樣且易於與他種構造或結構系統混用，如圖 1-1 所示系統性的複合構造，可於底部樓層使用鋼筋混凝土結構上部結構採用 GLT 柱梁系統，或是 GLT 屋架或桁架系統等，這些方式不僅減少結構負擔也適合台灣潮濕多雨的氣候，亦可製作複合型式的結構構件例如鋼柱外包集成材板以取代防火披覆等。鋼結構構材可回收重製，對於環境資源損耗較鋼筋混凝土低，若結合鋼結構柱與集成材梁及直交集成板(Cross-laminated timber, CLT)樓板的複合結構系統，在結構性能、施工以及成本上都有優勢，主要包含如下：

1. 為乾式預鑄施工方式，組裝快速，當達到達建築物生命週期末端時也可避免如傳統 RC 樓板鋼梁結合而必須採破壞式的拆除並分開回收的方式，節省了建設及拆除時的碳排放量。
2. 鋼結構製作精度高，工地現場與木結構接合困難度以及需要修整的程序大幅降低。
3. 工程木材取代了 RC 梁及 RC 樓板，結構重量可大幅減輕。
4. 純木結構的梁柱接合中需要採用金屬連接件介入傳遞剪力，而鋼柱木梁的複合結構中，連接件在鋼柱出廠時即已預先焊接完成，不僅精度高也節省現場連接件與木柱接合程序。

5. 相同斷面尺寸鋼柱與集成材柱相比，鋼柱強度與剛度比集成材柱高許多，可提高結構側向及垂直向的荷重能力以及穩定性。
6. 鋼柱與鋼柱間的接續以及鋼柱與基礎接合為剛性接合，強度可達到柱斷面強度，相較於木柱的續接以及木柱底部與基礎的半剛性接合的抗彎強度提高許多，一般木結構的接合強度多數僅能達 50%左右的斷面強度甚至更低，接合效率相較鋼柱低許多。
7. 在常見的木結構的梁柱接合形式中，金屬接合件透過螺栓與集成材柱固定(圖 1-2 左側)，接合件另一端同樣用扣件如金屬摩擦栓(dowel)與集成材梁連接，由於金屬機械性質高出木材許多，在與木材間傳遞剪應力時木柱表面不可避免會承擔來自 T 型鋼板連接件底板的垂直纖維方向壓應力，較早進入塑性變形，導致柱端部與金屬件接觸部位以及梁端部與扣件接觸部位的木材先降伏，因此相對於柱、梁構件的斷面強度，接頭的彎矩傳遞效率較低，接頭勁度也較低，此接合部在地震力的反覆加載下容易造成強度束縮(pinching)現象，強度與剛度逐漸下降[3,4]，如圖 1-3 所示，由於達成彎矩接合的難度以及造價較高，因而許多的設計或分析中將接合部設定為剪力接合。

基於以上優勢，鋼柱-集成材梁-CLT 樓板的複合系統的結構性能相較於單純集成材的系統高且穩定，形成重量輕而側向剛度及強度大的耐震結構，另外整棟建築均為可回收建材，對於減碳以及降低環境負荷能將有直接的助益。複合系統可能利用不同構造間的特性達成所需的性能目標，世界各國已有許多採用複合系統的案例，其中大型木結構建案幾乎都採用複合系統，國內推廣工程木材的應用，複合系統將是市場較為容易接受的選擇之一，基於鋼木複合系統的優勢，應提早因應未來可能遇到的問題。

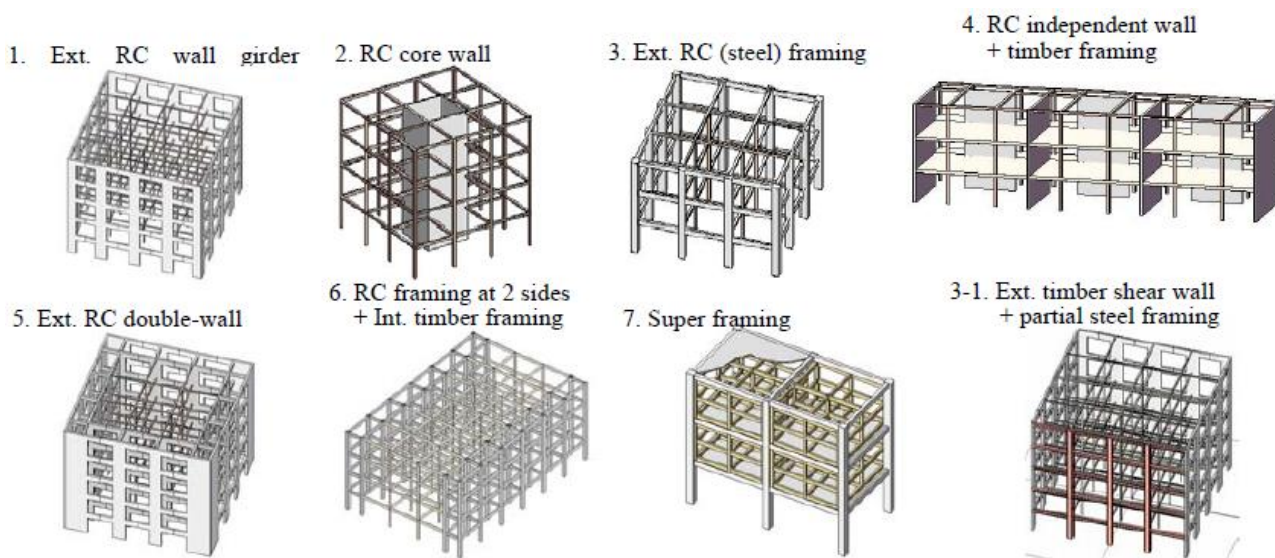


圖1-1 複合結構系統

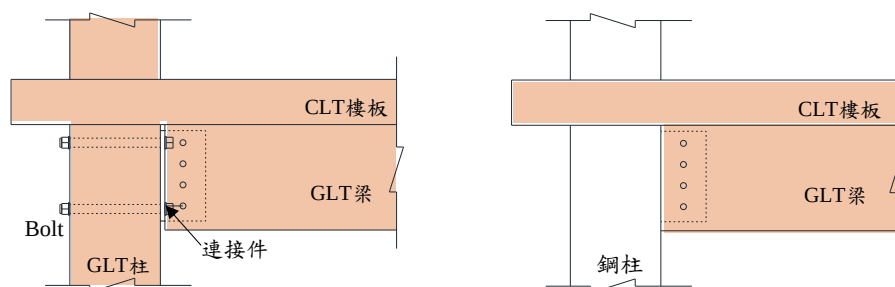


圖1-2 不同系統之梁柱接合部示意圖

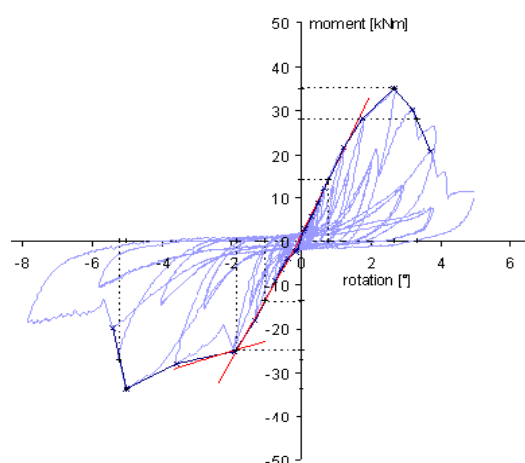


圖1-3 木構梁柱接頭彎矩與轉角關係[3]

耐火性能是木造建築推廣中被關注的焦點，除了使用防火面材外，大斷面的集成材可透過木材的炭化速率評估規定耐火時效後剩餘的有效斷面是否滿足結構短期荷載所需的最小斷面[5]，藉此評估是否符合耐火時效的規定，花旗松、柳杉等國內常用木種的集成材已有相關火害試驗，並且有可靠的炭化速率等數據供設計參考[6]，而接合部由於透過金屬扣件以及連接件相互接合，斷面因鑽孔、開槽等導致有效面積相對梁斷面減少許多，且由於現場施工性考量，金屬扣件如金屬摩擦栓或螺栓與木材間留有空隙，可能成為環境高溫竄入木材內側的通路，或者透過金屬扣件將高溫傳遞至木材內側，可能使得斷面炭化區域增加，接頭的強度及勁度下降[7,8]，造成梁的撓度進一步擴大，如圖1-4所示。國內外木構造建築物設計的防火相關規定均明定[5,9,10]，接合部金屬扣件應使用適當之防火被覆材或將金屬扣件設置於規定防火時效之安全斷面內，以確保接合部之強度，而由於此設計將減少接頭金屬扣件的有效承載長度，影響強度以及韌性，同時施工上比較複雜，實務上許多設計仍維持金屬扣件外露的方式，而扣件外露或使用遮蓋的接合形式目前並沒有國內火害實驗資料提供設計參考，除此之外，前述鋼結構柱與集成材梁結合的複合結構系統雖擁有許多優勢，而在耐火性能方面，鋼柱的耐火性能與要求與木材的要求卻不同，根據建築技術規則4樓以下鋼構建築物同樣要求一小時防火時效，但施作具一小時耐火性能披覆時，鋼材表面溫度可能超過400度(不可超過500度)[11]，此標準下位於木接頭內部鋼板連接件的高溫可能引起木材燃燒(圖1-2右側接頭內部的剪力鋼板)，因此在木材耐火時效內應抑制鋼材表面溫度至260度以下，如此對於鋼結構柱可能需要更高的耐火時效，對此疑慮目前尚無實驗直接證實，目前針對鋼柱與集成材梁複合結構中鋼材對應的防火披覆厚

集成材(GLT)應用於複合構造之接合部防火性能評估及設計方法建立

度等也尚未有相關的量化研究成果供實務界參考。



圖 1-4 使用金屬扣件接合部火害試驗結果[8]

第二節 研究目的

基於前述鋼結構柱與木梁接合部可能產生的耐火問題，本研究計畫以足尺的耐火試驗了解接合部在火害下的行為，並且透過實驗量化數據評估鋼柱與集成材梁接合部的耐火性能，將製作數座實尺寸之集成材梁-鋼結構柱的複合構造接合部試體，以標準的升溫區驗以 1 小時耐火試驗評估接合部的金屬扣件外露以及使用遮蓋時的接合部的耐火性能，前者為目前業界採用的方式，而後者為規範中建議採取的耐火措施，同時對於鋼柱將採用不同時效防火漆噴塗鋼材的表面，透過實驗觀察到的溫度變化以及傳遞方式，了解防火漆防火時效對接合部木材炭化範圍影響，藉此提供接合部防火設計的量化資訊供業界參考，以及在規範內增加複合構造及接合部耐火性能方面的補充資料或建議作法。同時透過斷面剩餘有效面積計算剩餘強度，並也透過結構試驗評估鋼柱集成材梁接合部在火害前後原有性能，作為剩餘強度計算方法的對照，預期成果包含建立使用國內外集成材梁(柳杉、花旗松集成材等)與鋼結構柱接合部之標準耐火實驗驗證、防火時效資料及設計方法，以及研提集成材與鋼結構接合部火害後之殘餘結構性能評估建議方法。

第三節 研究方法

包含製作足尺鋼柱集成材梁接合部試體，以耐火試驗了解接合部耐火性能，並透過結構試驗評估完整接合部力學性能以及耐火試驗後接合部的剩餘性能，作為剩餘強度評估計算結果的驗證，各組試驗的細節如下。

1. 鋼柱集成材梁接合部耐火試驗：

製作足尺鋼柱-集成材梁接頭試體，透過1小時耐火試驗評估梁斷面以及接合部斷面在梁幅及梁深方向上的炭化速度、炭化深度及有效剩餘斷面。其中集成材採用國內常用的材種，包含日本柳杉及北美花旗松集成材，接合型式以建築物常用的梁中間切縫內嵌剪力鋼板、並用金屬摩擦栓(Dowel)扣件的接合方式(圖1-5)，耐火試驗的試體將考量金屬扣件有無設計防火遮蓋對於接合部內部耐火性能的差異，前者將對金屬摩擦栓外緣預計木栓覆蓋，切縫處也將以等厚的木條遮蓋，提供扣件及連接件耐火防護，同時鋼柱除了在接合部區域被木材遮蓋的部分以外，在不同試體表面預計施作1小時或3小時防火時效的防火漆，探討不同防護下鋼材以降低鋼柱表面溫度。

耐火試驗將考量結構真實荷載狀況，預計由一棟設定的四層樓、跨距約為5米的結構中取出一跨並於上方施加固定荷載的方式進行火害試驗，試體以及實施方式如圖1-6，兩側為鋼柱、中間為集成材梁，兩端採用相同接合部設計及耐火細節，梁上方設置樓板，噴火口在樓板下方，對梁及接頭實施3面的火害試驗，模擬火災在室內延燒的狀況。樓板上方荷重大小由原結構中的長期樓板荷重決定，在1小時的耐火試驗過程中將量測梁的撓度變化，考慮結構雙向抗彎強度的一致性，鋼柱採方形鋼管柱。耐火試驗依照 CNS12514-1 之加熱溫度曲線進行測試。

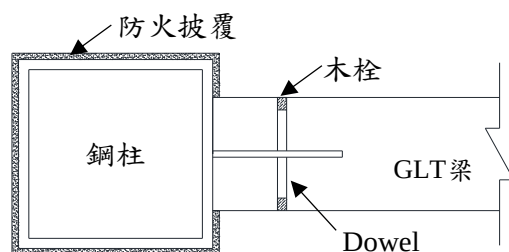


圖1-5 鋼柱-集成材梁接合部及扣件防火遮蓋之水平剖面示意圖

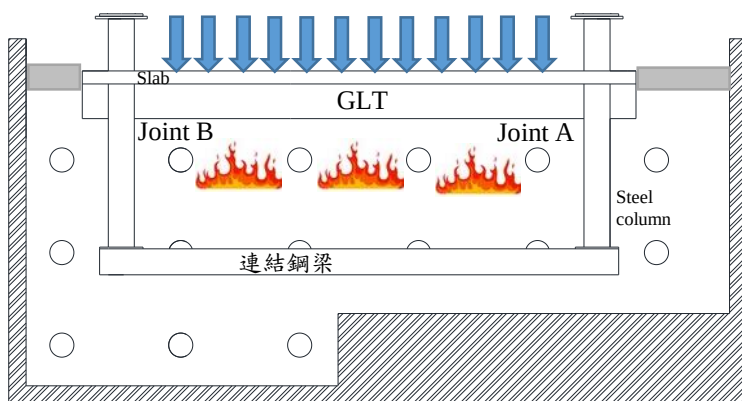


圖1-6 梁柱接頭耐火試驗示意圖

2. 鋼柱集成材梁接合部結構試驗：

實驗預計利用成功大學建築系結構實驗室的靜態實驗加載裝置，在大型的反力鋼框架中安裝接合部試體，梁端部以千斤頂施加位移控制的反覆加載，直至接合部破壞，評估接頭強度及韌性、接頭的破壞過程、極限狀態等量化數據，圖1-7為接頭試驗裝置的示意圖，可單次測試一組接合部試體，鋼柱頂部連接水平向千斤頂，柱底部為鉸接，柱兩端各透過接合部連接集成材梁，梁的外端連接垂直向的鉸接支撐，各自模擬樓層半高處以及跨距一半位置的反曲點位置，過程中將量測千斤頂出力以及位移，以求得接合部強度以及變形間的關係。

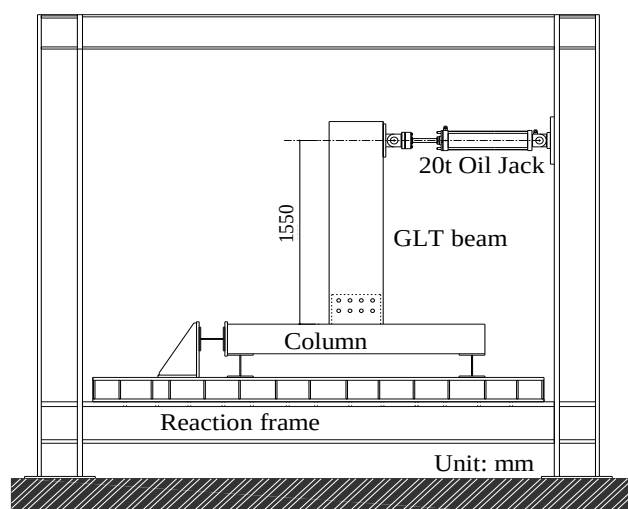


圖1-7 梁柱接頭抗彎試驗示意圖

第二章 文獻回顧

第一節 接合部防火規定

本節回顧內容中主要針對規範內的梁柱構架系統之接合部耐火相關規定，主要因為其梁柱系統構件單元較框組壁等組成單元的斷面大，且國內設計習慣將柱、梁等構材露出以塑造木造室內氛圍，因此耐火設計係在構件單元上依照耐火時效造成的碳化深度求得剩餘有效面積，藉此評估剩餘強度作為耐火設計。因此本節回顧的耐火規定以此系統為主：

我國：

木構造建築物設計及施工技術規範中第九章防火相關規定(對梁柱構架)：

(a) 構材之最小斷面應依防火時效設計，於時效內燃燒之殘餘斷面須符合結構設計承載能力所需之最小斷面尺寸規定。

(b) 不同材種集成材燃燒炭化深度依表 9.3-1。但經中央主管機關認可者得依認可炭化深度辦理。

(c) 木構材接合部位以金屬扣件接合時，應使用適當之防火被覆材或將金屬扣件設置於規定防火時效之安全斷面內，以確保接合部之強度。

柱、梁、間柱、橫撐木等主構架所使用的構材，若未設置防火被覆時，應預估防火時效內構材之燃燒炭化深度，設計適當之斷面尺寸，使於規定防火時效內燃燒之殘餘斷面（即安全斷面）仍具備結構應有之承載能力。木材之炭化深度，係假設炭化率（火災發生時，從木材表面向內部燃燒炭化之速度）固定，將其乘上持續燃燒時間後求得。

木構材接合部之設計應注意保護金屬扣件，避免火災持續燃燒期間因受火害之高溫影響，使金屬扣件強度衰減，導致接合功能之喪失。因此若使用金屬扣件接合時，應設置足夠厚度之防火被覆保護金屬扣件，或將接合金屬扣件設置在具防火時效之構材安全斷面內側。

日本：

日本國土交通省於平成 28 年改正的告示第 539 號內容針對建築主要構造為木造的大規模建築物的主結構部分的構造方法的規定中，在構造用集成材或直交集成材的接合部的規定中，建議能夠有效防止火害時接合部強度下降的措施。以下摘錄其內文

(i)接合部使用使用螺栓、摩擦栓、鐵釘或螺絲等扣件時，應使用木材或其他有助於防火的有效披覆。

(ii)接合部使用鋼材的添板(傳遞剪力的剪力鋼板、接合件)或其他類似物件時應將其埋入或夾入木材中，但是木材或其他材料已有使用有效的防火披覆時則不在此限。

上述的遮蓋方式可參考由日本集成材工業協同組合所出版的準耐火構造(集成材建築物)接合部耐火設計手冊中之接合部施作範例。

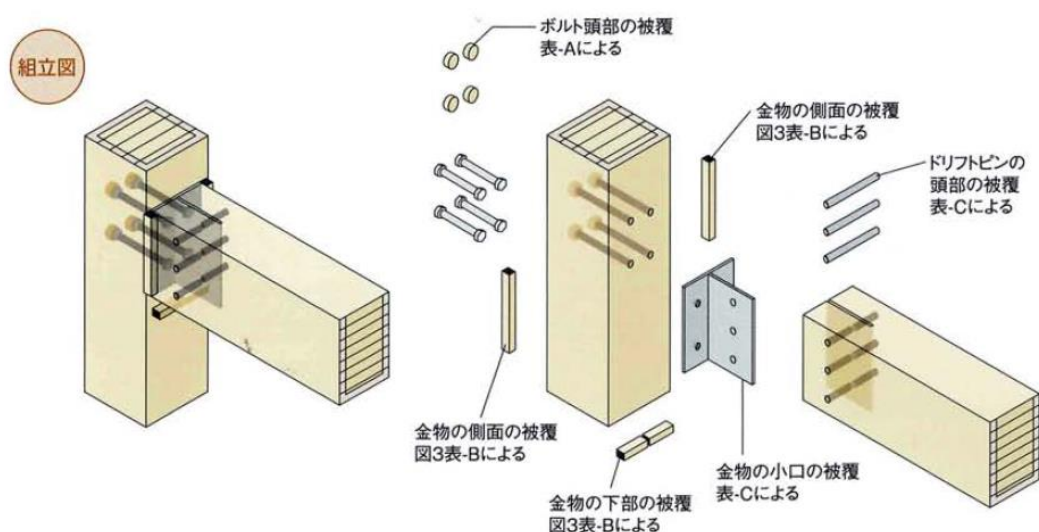


圖 2-1 梁柱接合部耐火遮蓋案例[12]

歐洲：

歐洲 EN 1995-1-2 為針對木結構火害相關規範，其中第六章為接合部的相關規定，主要針對耐火時數 1 小時以內的接合要求。對於兩端側板使用木材的接合部，其耐火時間以及尺寸規定如下表 2-1:

表 2-1 無保護扣件耐火時效以及要求尺寸[9]

	Time of fire resistance $t_{d,fi}$ min	Provisions ^a
Nails	15	$d \geq 2,8 \text{ mm}$
Screws	15	$d \geq 3,5 \text{ mm}$
Bolts	15	$t_1 \geq 45 \text{ mm}$
Dowels	20	$t_1 \geq 45 \text{ mm}$
Connectors according to EN 912	15	$t_1 \geq 45 \text{ mm}$
^a d is the diameter of the fastener and t_1 is the thickness of the side member		

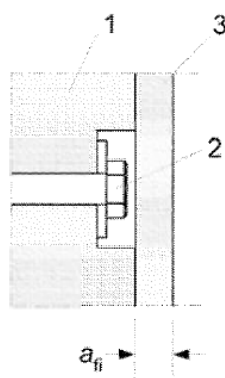
如摩擦栓(dowel)等耐火時數要增加到 30 分鐘，可透過增加側板厚度方式達成目的。若在扣件外側加上以木料為基礎的板材或是石膏板作為保護，則達到開始碳化所需的時間(t_{cn})需要滿足下列條件：

$$t_{cn} \geq t_{req} - 0.5t_{d,fi}$$

t_{req} ：目標耐火時效

$t_{d,fi}$ ：未保護時耐火時效(依照上表 2-1)

其精神係透過增加此額外的保護補足耐火時效不足的部分。對於螺栓則建議應以下圖方式予以保護：



Key:

1 Member

2 Bolt head

3 Member providing protection

圖 2-2 螺栓接合部保護方式[9]

針對接合部中心夾鋼板的接合部，外側木材對於鋼板的保護程度與鋼板寬度及厚度有關，如下圖所示，圖(a)因為鋼板寬度與木材齊平，兩側直接暴露於外面因此歸納為未保護接合，圖(b)、(c)、(d)則為具有保護性的接合型式，其中圖(b)因鋼板寬度較窄，在兩側形成縫隙，因此得到比圖(a)更好的保護，縫隙大小與板厚等有關，例如對於板厚小於 3mm 鋼板，兩側縫隙深度(d_g)若大於 20mm，可相當於有 30 分鐘的耐火能力，若要達 60 分鐘則需要 60mm 以上縫隙深度。其原理應為縫隙越深越窄，高溫對於內側鋼板的影響越小，耐火時間則得以延長，對於更厚的鋼板，雖然規範沒有相關規定，但依其精神，其縫隙寬度增加，其深度應較上述加大。圖(c)、(d)為使用填縫以及外側蓋板保護等方式。

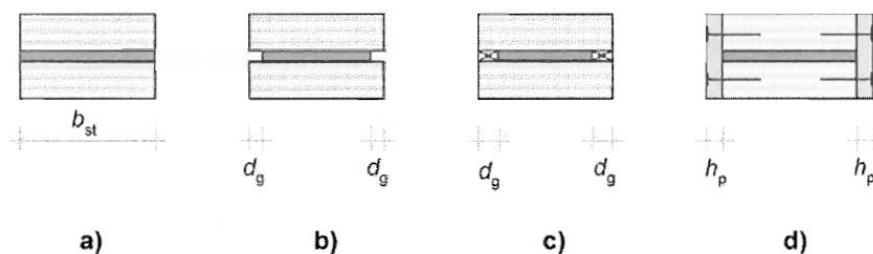


圖 2-3 鋼板邊緣保護形式[9]

對於外側鋼板，其處置方式依照(EN 1993-1-2)鋼結構規範中的耐火規定。

美國：

美國木構造設計規範(2018 NDS)第 16 章構材耐火設計中提到木構造接合部包含接合件以及扣件等都應該施加耐火保護以達到要求的耐火時效，保護層可由以木材為基材的製品或石膏板材等。

第二節 接合部耐火試驗相關研究

1. 抱 憲誓, 佐々木直幸, 宮本圭, 西村光太, 耐火集成材と鉄骨部材接合部の耐火性能, 日本建築学会技術報告集 第 27 卷 第 67 号, 1291-1296, 2021 年 10 月

作者針對鋼柱集成材梁複合構造中接合部進行耐火性能評估, 其中因為鋼構耐火披覆要求將鋼材溫度降到 400~500 度間, 而木材燃點在 260 度左右, 因此接合部中鋼柱可能將高溫傳遞至接合部內側鋼板而可能使接合部內側木材燃燒炭化現象, 因此透過耐火試驗評估若以較高耐火時效噴塗鋼柱表面時, 對於木梁內部鋼板連接件降溫效果, 試體如下圖 2-4, 鋼柱在接合部區域噴塗 3 小時防火漆, 其餘部分噴塗 1 小時防火漆, 而木梁採用日本國內針對高耐火時效開發的耐火集成材, 耐火實驗過程不施加载重, 其結果如圖 2-5 鋼板連接件下緣(編號 25、26)以及中間高度(編號 27、28)測溫點的結果顯示, 全程都能將溫度降低於 260 度以內, 反觀另一座採用 1 小時防火漆噴塗的梁對接的接合部試體, 其內部鋼材溫度達到 400 度。因此複合結構應注意鋼材耐火時效要求可能提高。

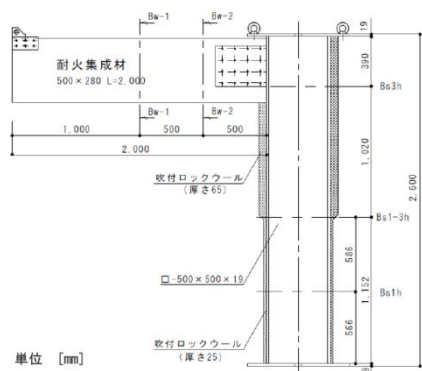


圖 2-4 鋼柱木梁耐火試驗試體[11]

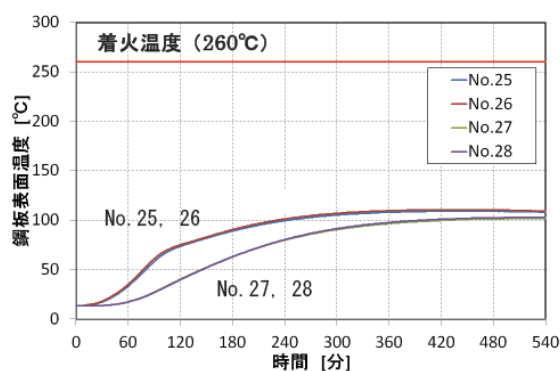


圖 2-5 鋼板接合件溫度變化[11]

2. 遠藤俊貴, 高木次郎, 鈴木淳一, 大宮喜文, 野秋政希, 見波 進, 荒木慶一, 下錦田聡志, “高力ボルトで一体化した鋼木複合断面部材の準耐火性能評価実験”, 日本建築学会技術報告集 第 17 卷 第 36 号, 543-547, 2011 年 6 月

有鑑於木材與鋼板結合一方面可以得到比純木構材更高的剛度及強度, 而外層的木材可以做為鋼材防火披覆等優勢, 有實務應用價值, 因此遠藤等人透過 1 小時耐火試驗評估以螺栓接合的鋼木複合構件的耐火性能, 實驗參數主要為木材對於中央鋼版的包覆程度, 試體 A 將兩側木材開槽, 完全將鋼板包覆於內側(圖 2-6 左側圖), B、D 試體則直接於兩側夾住鋼板, 兩試體的鋼板厚度分別為 19mm 及 9mm, 因此造成鋼板兩端有不同大小的對外開孔縫隙, 實驗後各斷面的炭化範圍如下圖所示, A 斷面由於鋼板有良好包覆內側仍有相當程度的剩餘斷面, 而 B 試體縫隙開口較 D 試體大, 因此斷面積幾乎完全炭化, 試體失去承載能力, 而 D 試體則仍殘留一部分有效斷面。此結果與前述歐洲規範中考量一致, 對於開口縫隙大(中間鋼板較厚)接合部, 應考量於縫隙填塞防火遮蓋。

4. Aaron O. Akotuah, Sabah G. Ali, Jeffrey Erochko, Xia Zhang, George V. Hadjisophocleous, “STUDY OF THE FIRE PERFORMANCE OF HYBRID STEEL-TIMBER CONNECTIONS WITH FULL-SCALE TESTS AND FINITE ELEMENT MODELLING”, Proceedings of the International Conference in Dubrovnik, 15-16 October 2015

Akotuah 等人以實驗及有限元素模擬方式評估採材用金屬連接件的接合部耐火性能，試驗中所採用的連接件有圖 2-9(a)所示的兩種，分別為中間插入型(CN)以及外面兩側鋼板包覆型(EX)兩種，試驗以鋼柱透過連接件與木梁接合，同時於上方施加荷重，試驗結束後切割梁中段以及接合部斷面，如圖 2-9(b)、(c)，可見接合部的炭化面積遠較梁斷面大，在摩擦栓周圍也有炭化情形，表 2-2 整理了梁中間斷面、CN 型接合部以及 EX 型接合部斷面的平均炭化層厚度以及炭化速率，鋼板插入型因為斷面原先缺損較大，而且有金屬摩擦栓的存在，炭化速率最高，梁中央斷面炭化速率次之，而兩側鋼板覆蓋型(EX)接合部則因為外側鋼板有接近保護內側木材功效，且木材不需要中間切縫，斷面缺損也較少，炭化速率最低，平均炭化層厚度也最薄。

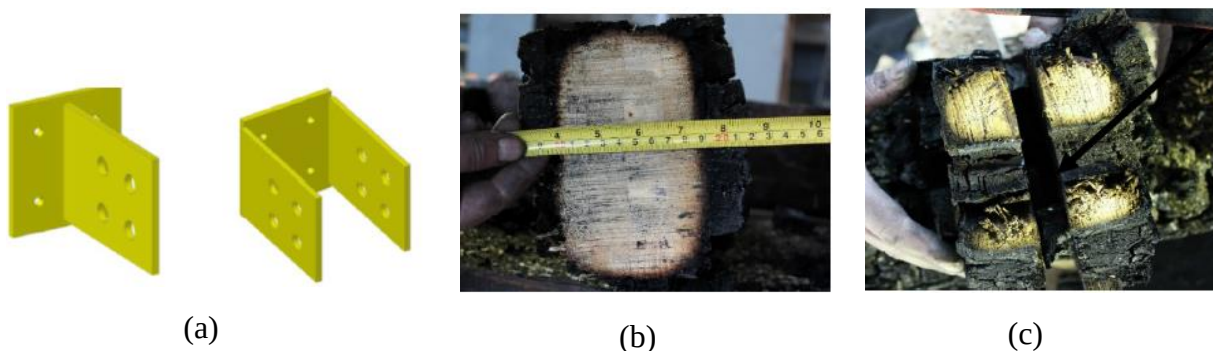


圖 2-9 試體: (a) 接合件形式; (b) 梁中央處切面; (c) 接合部切面 [15]

表 2-2 炭化深度與炭化速度[15]

	Beam Center (CN and EX)	CN at connection	EX at connection
Charred layer (mm)	27.5	33	14
Charring rate (mm/min)	0.78	0.94	0.56

第三章 接合部耐火實驗

第一節 試體設計

耐火實驗依照前述所說的試驗參數設計四組試體，試體及其參數如表3-1，兩組採用日本柳杉，兩組採用花旗松集成材，第一組試體(CW)為柳杉集成材梁柱，第二組試體(CS_1)採用柳杉集成材梁以及一小時防火漆噴塗的方型鋼管柱，第三組試體(PS_3)採用花旗松集成材梁以及3小時防火漆噴塗的鋼柱，第四組試體(PS_C3)與第三組試體相同，但是摩擦栓外側以及梁切縫處分別以花旗松木栓以及木條遮蓋，鋼柱防火漆噴塗範圍僅為鋼柱表面，炭入木梁中的金屬剪力鋼板僅塗防鏽底漆。實驗將在梁、接合部的不同位置、斷面深度以及鋼柱不同位置均埋設熱電偶，量測各組實驗參數下，各區域溫度在不同加熱時間下的變化以及最高溫度，實驗結束後將單側接合部炭化表面刮除以及切片以確認各部位的炭化深度、炭化速度、剩餘斷面及剩餘強度等，另一側接合部則送至成大建築系結構實驗室進行單側加載試驗以評估剩餘強度，各組實驗所得之量化數據可供實務設計參考。

表3-1 實驗試體以及參數表

試體	GLT 材種	扣件防護	柱	柱防火塗裝
CW	柳杉	No	GLT 柱	無
CS_1	柳杉	No	鋼柱	1小時耐火
PS_3	花旗松	No	鋼柱	3小時耐火
PS_C3	花旗松	Yes	鋼柱	3小時耐火

圖 3-1 至圖 3-4 為四組試體柱、梁以及接合部的尺寸，設計時設定四層樓跨距 5 米建築，室內為辦公室空間，在活載重 300kg/m^2 、靜載重 130kg/m^2 條件下設計柱梁尺寸，分別為斷面 $200\times 400\text{mm}$ 的梁，第一組的柳杉木柱為 $240\times 240\text{mm}$ 斷面，柳杉梁選用對稱異等級 E75-F240 集成材，柱為同樣等級的對稱集成材，而第三組以後的花旗松梁為同樣尺寸，等級為 E105-F300，上述集成材之集成元厚度均為 3 公分，膠合劑採間苯二酚樹脂黏著劑及酚-間苯二酚-甲醛共聚合樹脂硬化劑，鋼柱為 BCR295，斷面尺寸為 $250\times 250\text{mm}$ 、厚度 9mm 的方型鋼管柱。

接合部依傳遞力量的型式可大致分為剪力接合以及抗彎矩接合兩種，兩種設計會影響接合鐵件型式以及扣件(摩擦栓或螺栓)的分布方式，前者設計僅檢核剪力，後者因為預期接合部能夠發揮抗彎矩強度，扣件排列方式堆多已方陣或是同心圓方式排列以使扣件群中心作為彎矩軸心而有效率的獲得個單元連接件提供的彎矩強度，同時剪力連接件多採鋼板型式，一端插入木梁，另一端則插入木柱當中。而剪力接合有精度要求較低及施工較為便捷等特性，國內有許多採用此種接合型式，故本研究採此種接合部作為實驗對象，試驗中採用的剪力連接件以及摩擦栓等為 SS400 材質鋼。

第一組採木柱接續木梁試體為其他組的對照組，梁柱接合部採用 T 型鋼板連接件，一端插入木梁中央透過摩擦栓連接，另一端透過螺栓穿過木柱後與另一端連接件固定，如圖 3-1 所示，為容納鋼板以及螺栓，梁端部設有貫通梁上下的開孔，開口大小為 $140\times 34\text{mm}$ ，鋼板連接件厚

度為 9mm，木梁開槽為 11mm，接合處採用 8 跟直徑 14mm 摩擦栓，透過檢核接合部容許剪力強度能足夠負擔荷重產生最大剪力，同時接合部極限狀態不為木材割裂或剪壞控制，屬於 JB 等級接合部。梁斷面同時檢核長期潛變以及瞬時變形，以及扣除 40mm/hr 炭化深度後，剩餘強度與短期荷重的檢核。詳細檢核資料檢附於附錄三中。

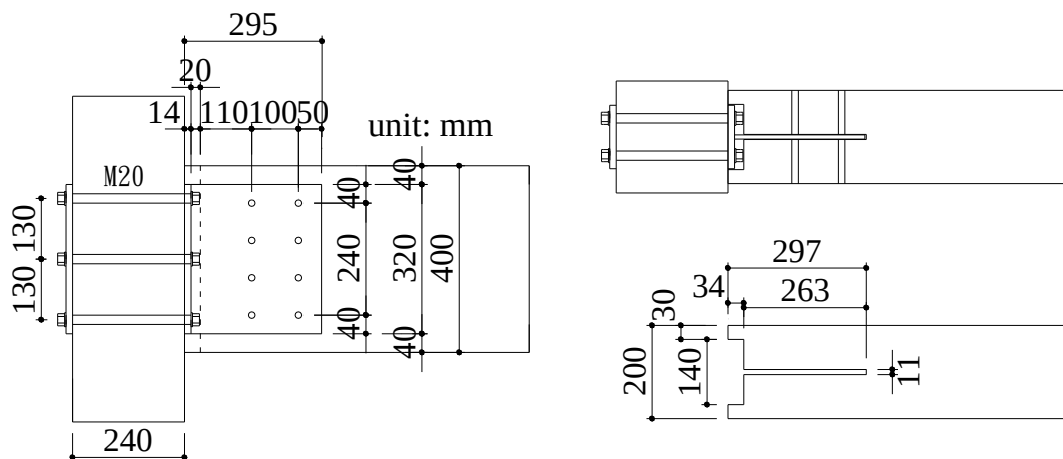


圖 3-1 第一組試體接合部圖

第二組試體接合部設計與第一組相同，僅將鋼板連接件預先焊接於鋼柱上，因此摩擦栓尺寸以及數量不變(圖 3-2)，第三組試體採用強度較高的花旗松梁，因此採用直徑 16mm 摩擦栓 6 支，即可維持與前幾組相近的接合部的抗剪強度(圖 3-3)，第四組試體因為摩擦栓外側將採用 2 公分厚的木栓遮蓋，因此摩擦栓長度共減少 4 公分，為維持相近的長度直徑比，以及接近的接合部強度，改採直徑 14mm、8 根摩擦栓，以上各組接頭的強度約維持在 100 至 112kN 間，詳細數據可參照附錄三。

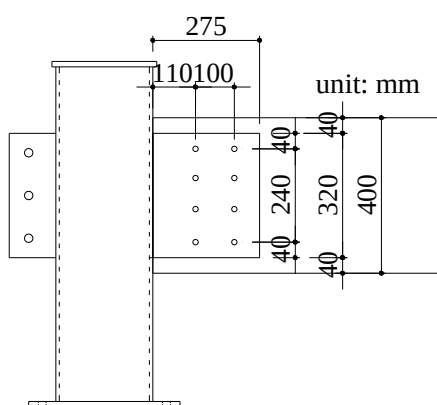


圖 3-2 第二組鋼柱柳杉梁試體

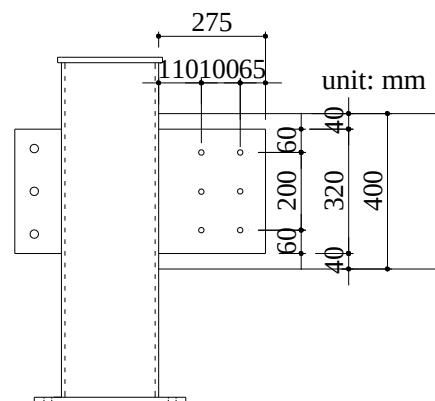


圖 3-3 第三組鋼柱花旗松梁試體

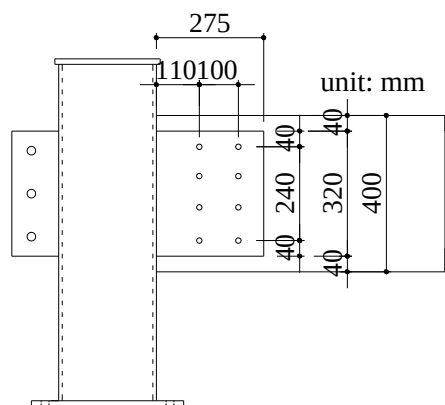


圖 3-4 第四組鋼柱花旗松梁且有遮蓋之試體

各組試體兩端柱與木梁接合後構成的單元試體如圖 3-5 及 3-6，後者代表第二至第四組試體，僅在接合部摩擦栓數量及直徑有所差異。木梁長度為 2950mm，木柱高 920mm，鋼柱高 895mm，兩端設有端板供鋼底梁接合，以及後續的結構試驗固定使用。

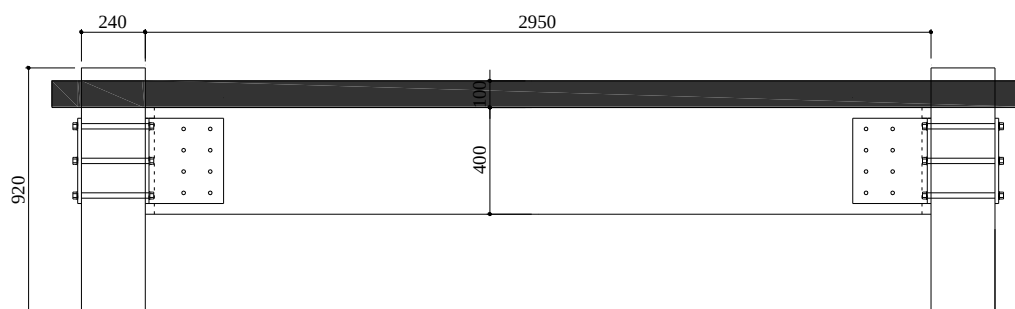


圖 3-5 第一組試體安裝圖

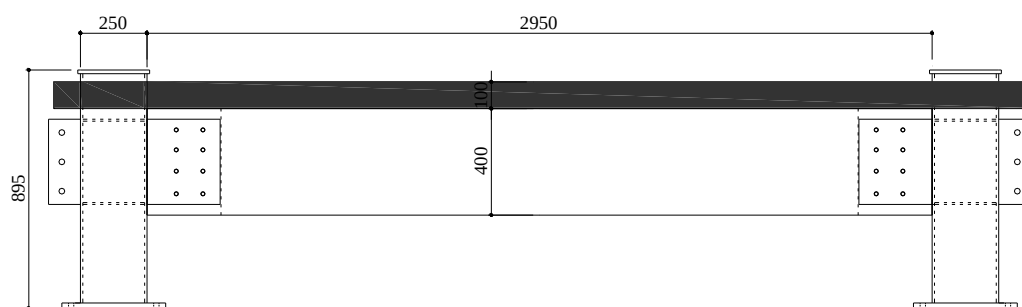


圖 3-6 第二至第四組試體安裝圖

第二節 實驗規劃

實驗使用內政部建築研究所防火實驗中心大型柱梁爐，如圖 3-7 所示，側端空地為灑水降溫區域，各組接合部試體組裝完成後即與柱爐蓋板以及圖中左側的綠色反力框架接合，圖 3-8 為試體組裝圖，柱底部與 H 鋼梁連接，兩端柱外側連接水平鋼梁，鋼梁再與底部聯繫鋼聯間以角鋼連接形成三角拱，如此維持兩端的柱在梁中央受力時能為維持垂直狀態，位移計量測到的變形主要來自梁的撓度以及接合部的旋轉變形，試體兩端的水平鋼梁再透過接續鋼柱與爐蓋及反力框架接續。試體連同爐蓋等放入柱爐後情形如圖 3-9，千斤頂於梁中央施加 2 頓垂直載重，千斤頂反力由框架以及爐蓋形成的反力機制抵抗。



圖 3-7 建築研究所防火實驗室大型柱梁爐

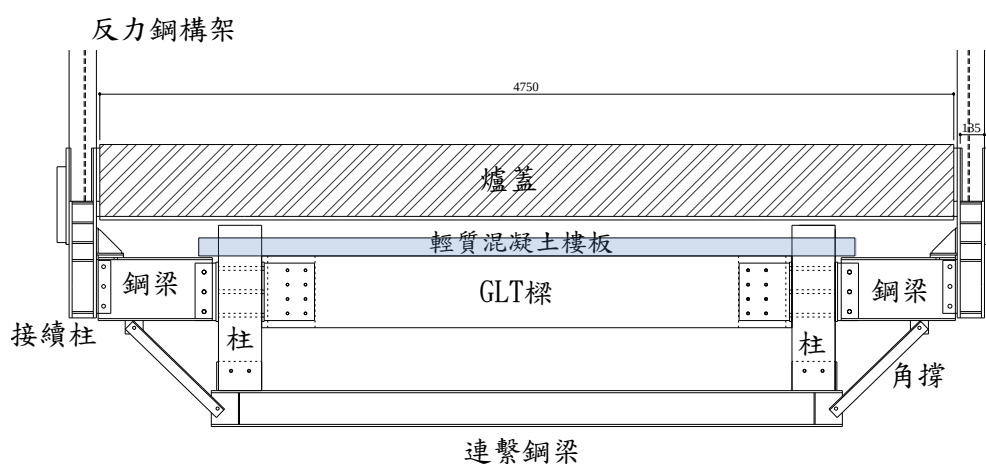


圖 3-8 試體與爐蓋、反力框架組裝圖爐

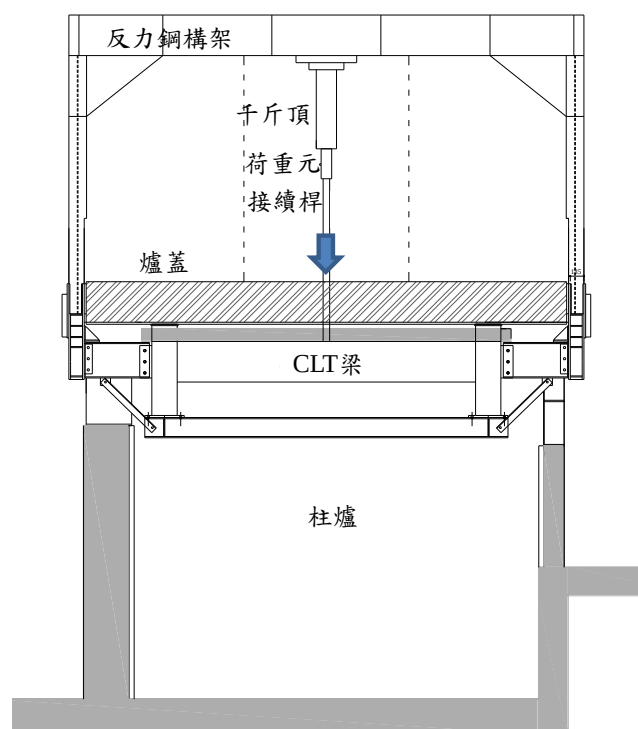


圖 3-9 試體安裝於爐內時整體實驗系統圖

試驗程序將依照下列步驟執行：

1. 千斤頂先行加載至預定荷重，並持續 15 分鐘觀察變形有無增加，待系統穩定後再開爐火。
2. 記錄當時溫溼度，在室溫下點火，依照耐火試驗依照 CNS12514-1 之加熱溫度曲線進行測試。
3. 實驗結束立即關火，並將位移計拆線、千斤頂及荷重元接線拔除。然後盡速將試體吊至預定位置噴水降溫。
4. 試驗過程若中央撓度超過 60mm(L/50)，或是發生可能影響試驗安全事件，將提前終止試驗。

測溫點分布：

試體可以分為採用木柱的接合部試體以及採用鋼柱的接合部試體，其接合部細節有所不同，兩種測溫點的分布如圖 3-10 及圖 3-11 所示，第一組試體在木梁跨距中心點偏左側 20 公分處斷面的不同深度埋設熱電偶(圖 3-10 中右側)，由下往上每 3 公分埋設一處，另外斷面中心處以及離側邊表面 4.5 公分處各埋設測溫點，藉此了解接近跨距中央處斷面各處的升溫情形。而在接合部(圖中左側)則在 T 型接合件底部(標記 C1~C3)、底側螺栓(C4)、接合件中央高度處(C6、C7)以及此位置的螺栓表面(C5)裝設測溫點，由於木梁接合部底部開口無遮蓋，且接合件底端離木材表面的深度僅 4 公分，因此預期受火害影響較大，為試驗過程中觀測重點。

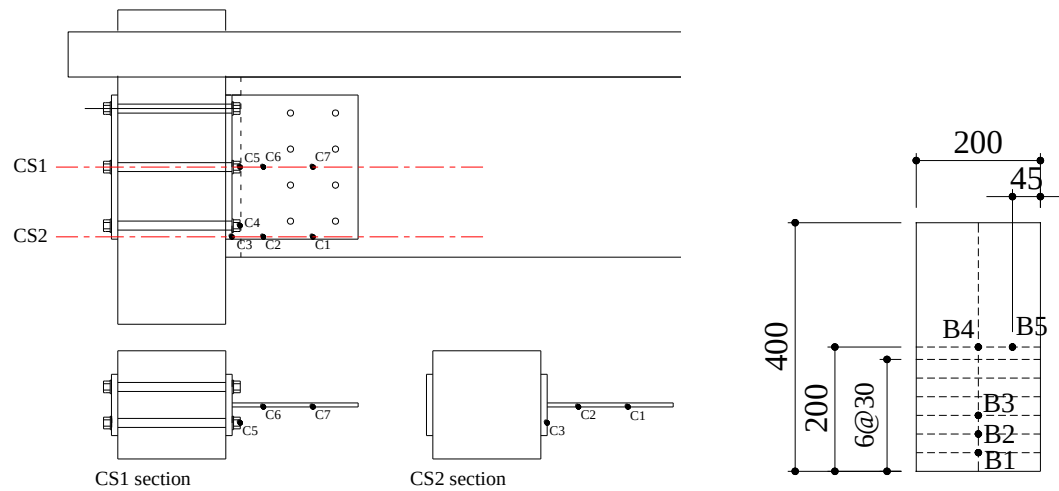


圖 3-10 第一組試體量測位置

圖 3-11 為採用鋼柱試體的標準量測位置圖，跨距中心附近梁斷面測溫點布設位置與前一組相同，接合部區域則同樣在連接件底部以及中央高度處設置測溫點(C1~C4)，此外由於各組試體的鋼管柱採用不同時效的防火漆噴塗，因此在鋼柱內部也佈設多組熱電偶監控溫度變化。

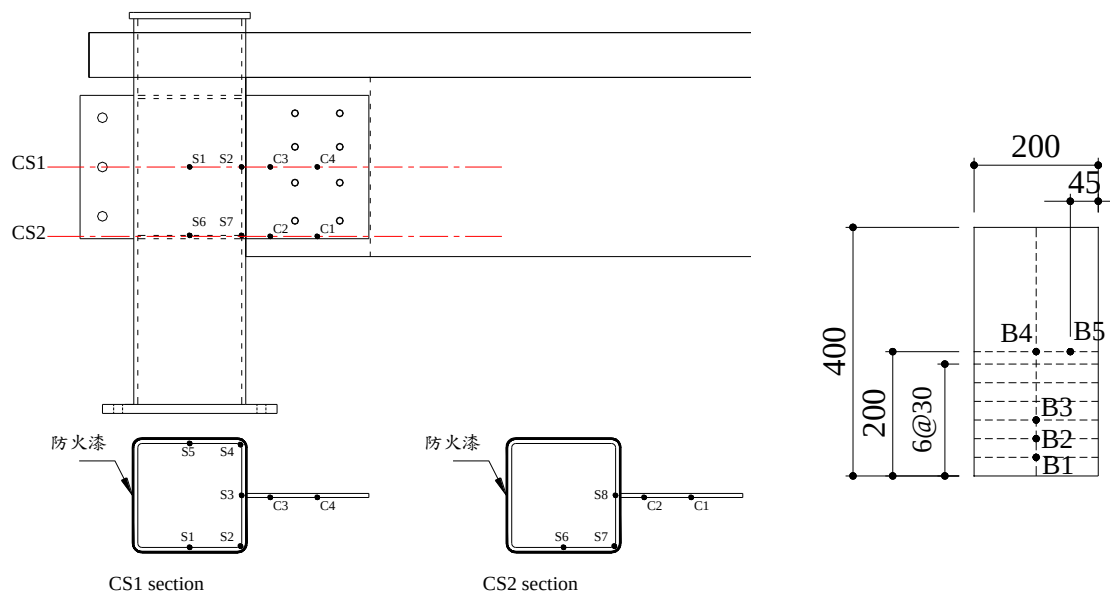


圖 3-11 第二組試體量測位置

第三節 試體準備與製作

各組鋼柱端板留有開口供柱內安裝電熱偶(圖 3-12)，另外在與鋼柱相連的鋼板連接件中央以及底部各裝設如圖 3-11 所示的測溫點，測溫線由下往上彙整，木梁安裝時則由連接板下方往上抬升至定點後再打入摩擦栓，圖 3-14 為梁內部的熱電偶安裝完成後測試情形，溫度顯示為當時氣溫。

梁的上方安裝 10 公分厚單元長寬分別為 60 公分及 40 公分的輕質混凝土樓板，樓板透過 M10 自攻螺絲跟木梁固定，樓板間以耐火泥黏結，跨距中央的樓板間接縫則填塞防火棉使得樓板能夠與木梁一同變形，避免樓板與木梁間因為彼此剛度不同當梁彎曲時在介面形成縫隙導致火苗竄入，樓板也於此跨距中心處開口供施加固定載重的千斤頂施力，如圖 3-15，後續在此處將安裝承力鋼盤，以傳遞千斤頂力量至木梁，另外，位移計拉線也將固定於此處。



圖 3-12 鋼管柱安裝電熱偶情形



圖 3-13 鋼柱連接板安裝熱電偶情形



圖 3-14 木梁熱電偶安裝完測試情形



圖 3-15 輕質混凝土樓板供千斤頂在梁上方施力開口

試體在組裝過程中底部鋼梁兩側安裝往水平方向延伸的短梁，以及水平斜撐讓試體能夠獨自穩定站立，如圖 3-16 所示，待樓板、兩端水平鋼梁、斜撐等安裝完畢後則開始包覆防火棉。圖 3-17 為第二組試體與爐蓋、反力框架組裝完成後，透過吊車點起情形，於試驗受熱條件無關的鋼梁等以及樓板上方與爐蓋間隙都包覆防火棉。試體調至柱爐上方後即可安裝，圖 3-18 為柱爐側邊開口以防火棉封裝情形，最後，在爐蓋的中央部位有方形開口供千斤頂桿延伸至木梁上方，位移計拉線也沿著 H 型鋼梁由外側至木梁上方固定，藉以監測實驗過程中撓度的變化(圖 3-19)。

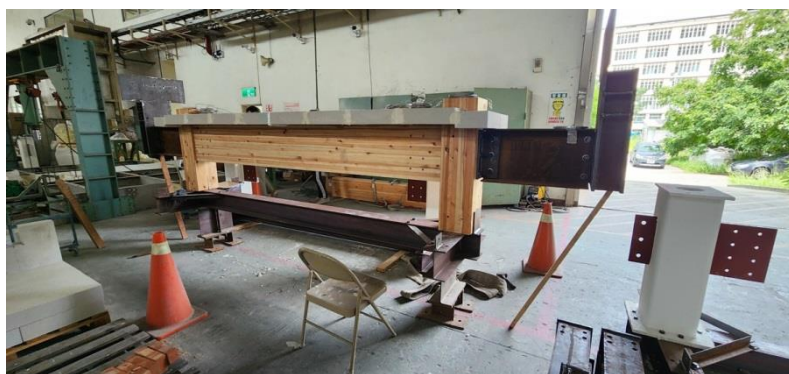


圖 3-16 第一組試體與底座鋼梁以及側邊鋼梁接續後情形



圖 3-17 第二組試體與爐蓋、反力框架組合後吊裝情形



圖 3-18 試體安裝於柱爐後側邊開口的封裝情形



圖3-19 柱爐上方爐蓋開口處作業情形

第四節 實驗結果與分析

各組試體於實驗結束爐火關閉後，盡速將試體連同爐蓋以及反力框架一同吊出，移至鄰近空地噴水降溫，從關火至噴水開始約經歷 4 分鐘，對試體耐火試驗結果應屬輕微，圖 3-20 為關火後試體從爐中吊起情形。



圖 3-20 第一組試體耐火試驗後吊出情形

圖 3-21 為柳杉集成材柱與梁接合部試體火害試驗前後照片，防火棉包覆範圍包含兩側木柱底部、底部接續鋼梁以及兩側水平接續鋼梁，由火害試驗後可看暴露火場的木構試體外表已完全炭化。在接合部位位置(圖 3-22)可看出原先遮蓋 T 型鋼板接合件兩側各 3 公分厚木材已經燒盡導致內側鋼板外露，同時接合部底部以及上緣都可看出缺口，這是因為接合部下方開口部位木材突出部厚度較薄，燃燒較快，圖 3-23 可看出梁下方開口處在試驗前後差距，接合件下方已經完全露出。另外因為木梁表層燒失可由圖 3-24 接合部側邊圖看出摩擦栓露出的狀態。



圖 3-21 第一組試體(CW)火害前後照片



圖 3-22 接合部火害前後照片

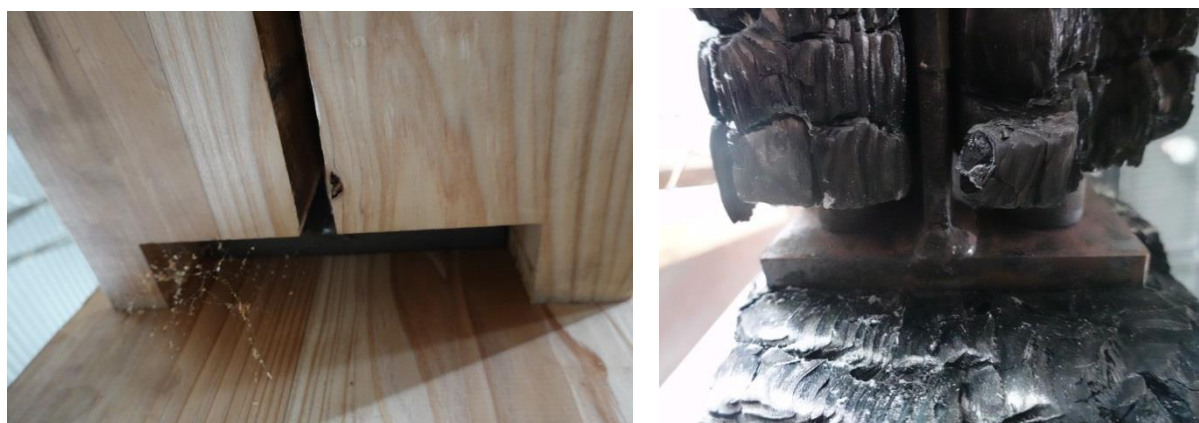


圖 3-23 接合部下緣開口處火害前後照片



圖 3-24 接合部及木梁側面照片

本實驗於開始 53 分鐘時因為火焰從爐蓋中央開口冒出，考量實驗安全而中止試驗，圖 3-25 中粗黑線為爐內平均溫度，至 53 分為止溫度上升至 920 度，梁中央斷面各位置溫度都不高，離木梁最下緣 3 公分處測溫點最高溫度也僅約 200 度，接近 20 分鐘時溫度突然上升現象應為木材開始燃燒引起的升溫現象，後期約 45 分鐘時數個量測點溫度略有下降，可能是熱電偶失

效造成。圖 3-26 為 T 型鋼板連接件上方的溫度變化，其中 C3 點為連接件下緣離大開口最近的測溫點，溫度上升程度最顯著，至 53 分鐘實驗終止為止的溫度約為 500 度，位於底端其他位置測溫點也都達到 300 度以上，而位於連接件中央高度的溫度(C6)僅達到約 150 度，可見木材對於內部的鋼板具有保護作用。

由於實驗後期火焰自千斤頂加載處的爐蓋開口處竄出，以至於燒毀位移計鋼線固定點使位移計失效，圖 3-27 為位移計失效前量測的中央點撓度變化，在 46 分鐘時約達 18mm，相當於 $L/164$ ，若以此曲線外推至 60 分鐘時，撓度應可達 30mm，約略為 $L/100$ 程度。

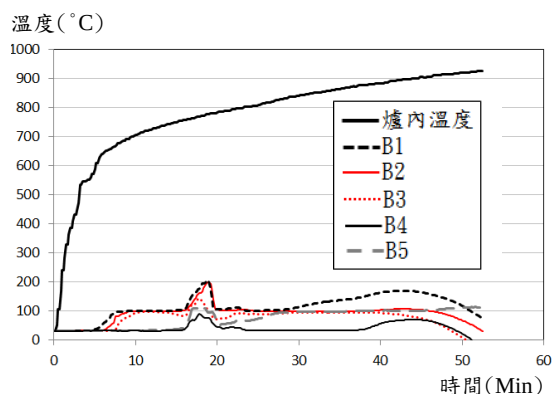


圖 3-25 爐內平均溫度與梁中央斷面溫度變化

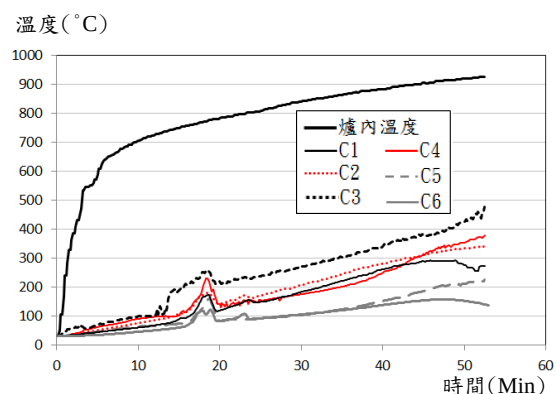


圖 3-26 連接件表面溫度變化

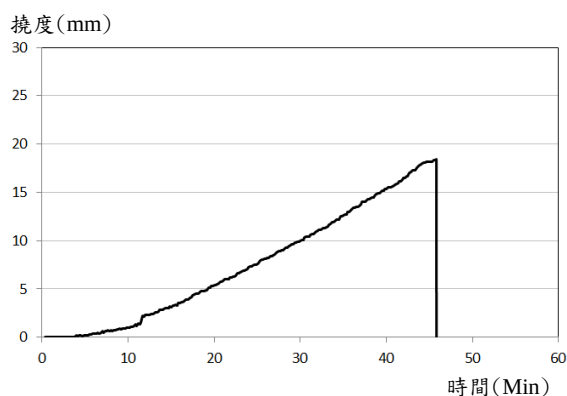


圖 3-27 梁中心點撓度變化

第二組試體(CS_1)的鋼柱表面有 1 小時防火漆塗裝(圖 3-28)，與鋼柱焊接的鋼板接合件表面僅有防鏽塗層，試驗中鋼柱(白色防火塗裝部分)裸露，其餘部分有防火棉遮蓋。本次實驗雖在爐蓋中央位置增加填塞防火棉，實驗進行至 57 分鐘時仍然因為火焰竄出過大而終止試驗。圖 3-29 為實驗後經過噴水滅火降溫照片，鋼柱表面防火漆經水沖刷後掉落，接合部可看出摩擦栓周邊木材燒失顯得摩擦栓突出的現象，其餘部分相較於第一組試體以較完整，中央的鋼板連接件未露出。

圖 3-30 為爐內平均溫度與梁中央斷面內各測溫點溫度變化，實驗開始約 20 分鐘後出現一波升溫現象，前一組試體亦有相同情形可能為木材燃燒所致，此斷面的中央深度離側面 4.5 公分處的測溫點溫度最高升至約 350 度，其餘位置僅為 100 度左右。圖 3-31 為鋼柱內側的溫度變化，在實驗終止(57 分鐘)時各位置溫度約為 400-420 度之間，而鋼板連接件的溫度則在下方

靠近開口縫隙處溫度最高(圖 3-32 中 C1、C2 測溫點)，此位置雖離木梁下表面有 4 公分，但最終升溫至接近 400 度，此附近的木梁內側可能也已經炭化，詳細將於木梁切面後進行評估，而連接件中央部位溫度約最高約為 270 度，此處雖無足夠空氣供燃燒卻會因熱分解使其斷面逐漸炭化，若依實驗曲線延伸，60 分鐘時此區域可能高達 300 度，相較於前一組試體相同位置僅有 150 度情形，應是鋼柱傳導透過連接件將高溫至木梁中心所致。圖 3-33 為木梁中心撓度變化，57 分鐘約達 2 公分，約為 $L/150$ 左右。相較於前一組木柱-木梁接合部試體，本組鋼柱木梁試體的剛度較大。



圖 3-28 第二組試體(CS_1)試體組裝完成照片



圖 3-29 試體火害後照片

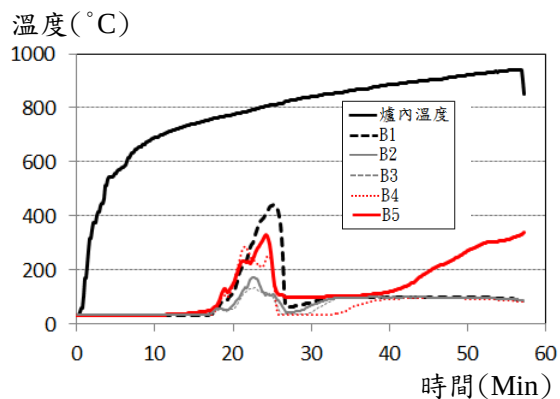


圖 3-30 爐內溫度與木梁斷面溫度變化

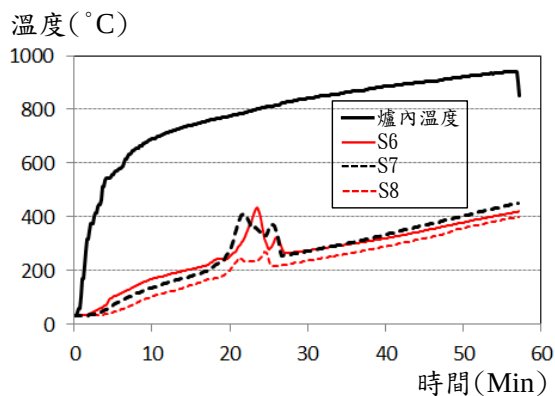


圖 3-31 爐內溫度與鋼柱內部溫度變化

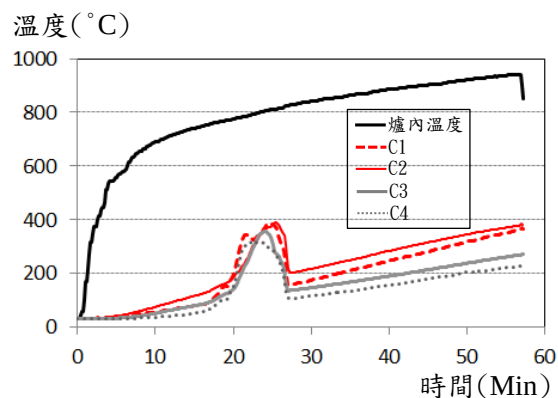


圖 3-32 爐內溫度與連接件表面溫度變化

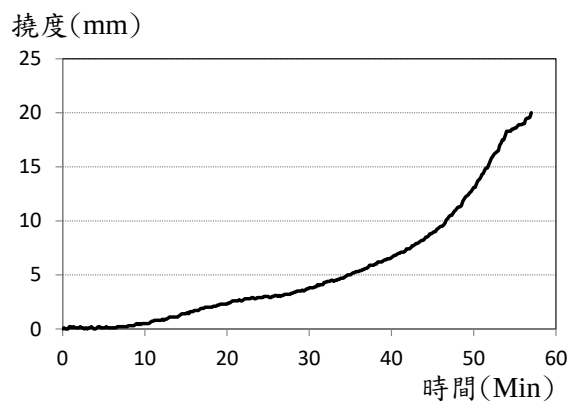


圖 3-33 木梁中心撓度變化

第三組試體為噴塗 3 小時防火漆鋼柱連接花旗松及集成材梁，火害後照片如圖 3-34 所示，木材表面炭化深度相較柳杉試體淺，摩擦栓突出狀況較不明顯，圖 3-35 及圖 3-36 為木梁內側溫度曲線以及鋼柱內部溫度變化，兩者的溫度較前一組柳杉以及採 1 小時防火漆的鋼柱試體下降，鋼柱方面溫度僅為前者的一半，約為 200 度，同時埋在木梁接合部內的剪力鋼板溫度也由 400 度降至約 200 度(圖 3-37)，顯見鋼柱表面防火性能會影響埋在木材內鋼材溫度變化。試體 60 分鐘火害試驗後撓度約為 17 公分(圖 3-38)。



圖 3-34 試體火害後照片

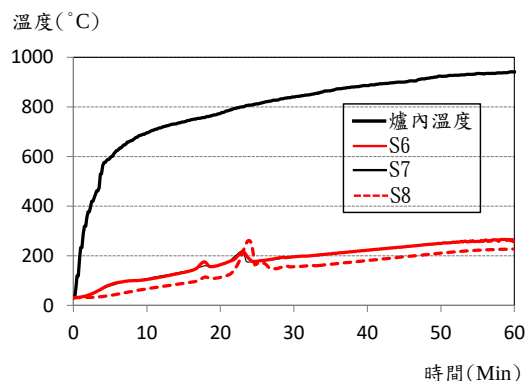
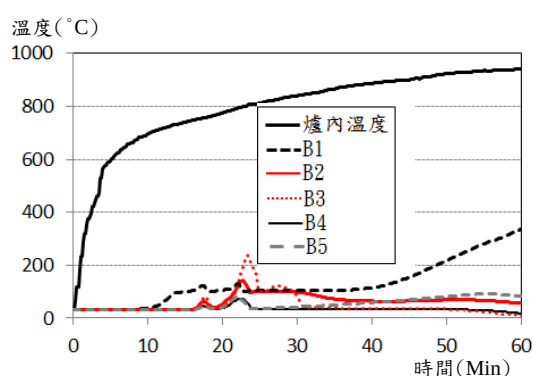


圖 3-35 爐內溫度與木梁斷面溫度變化 圖 3-36 爐內溫度與鋼柱內部溫度變化

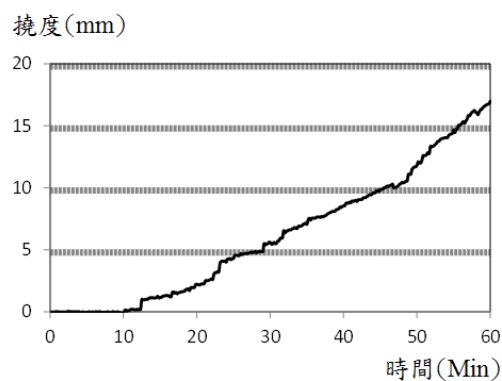
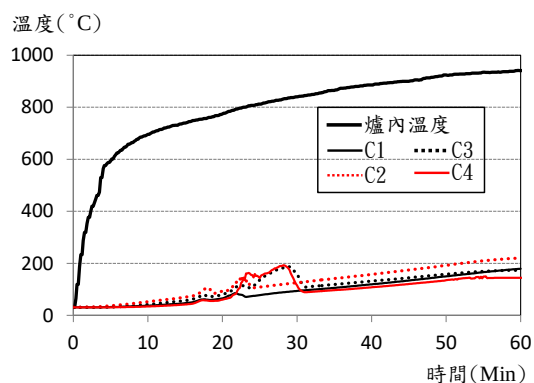


圖 3-37 爐內溫度與連接件表面溫度變化

圖 3-38 木梁中心撓度變化

第四組試體為 3 小時防火噴塗鋼柱連接花旗松集成梁，但摩擦栓外側以及梁底部開縫處都有兩公分厚的木塞遮蓋。圖 3-39 為火害後接合部外觀照片，局部摩擦栓有外露，梁內部以及鋼柱內部溫度變化與前一組試體相近(圖 3-40、圖 3-41)，鋼柱表面溫度約為 300 度，夾在木梁內側的剪力鋼板溫度(圖 3-42)溫度有稍微降低，整體約在 170 度左右，至實驗結束為止，整體木梁的撓度約為 13 公分，為四組試體中最低。



圖 3-39 試體火害後照片

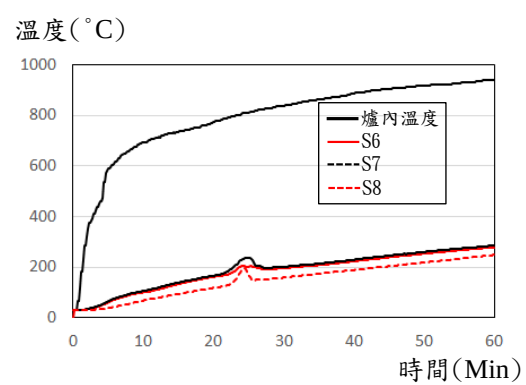
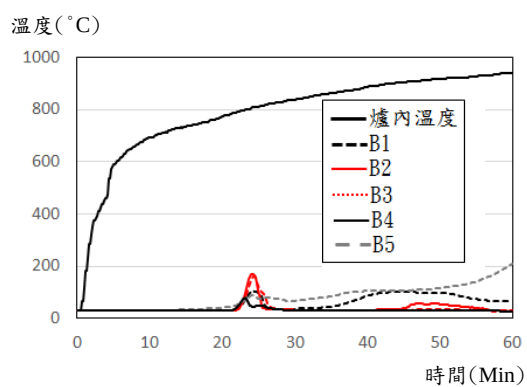


圖 3-40 爐內溫度與木梁斷面溫度變化 圖 3-41 爐內溫度與鋼柱內部溫度變化

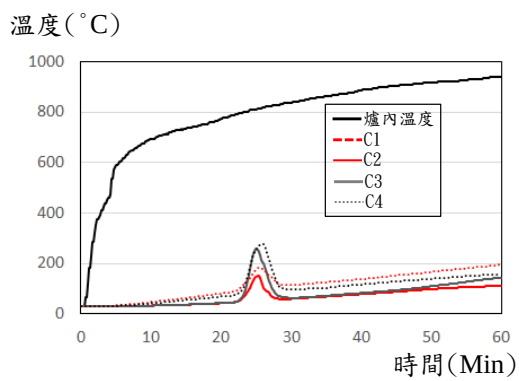


圖 3-42 爐內溫度與連接件表面溫度變化

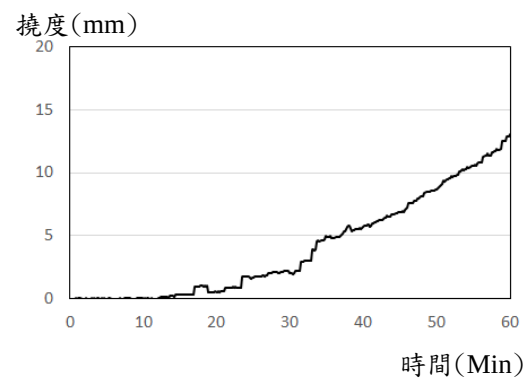


圖 3-43 木梁中心撓度變化

第五節 炭化深度與速率

四組試體各自從一側的接合部中的摩擦栓縱列位置的斷面，往跨距中央方向取 7 個橫斷切面(編號分別為 L0~L6)分析炭化深度與範圍，其位置如圖 3-44，另一側剩餘半跨的接合部試體則以結構側推試驗評估結合部剩餘強度，相關結果將於下一章節描述。梁的側向炭化深度評估則由梁的上端起算(圖 3-45 的底側)量測 8 個位置的單側向平均炭化深度，再求取各位置的平均得到單側側向炭化深度，而梁深方向則取 B1 及 B2 兩個位置的平均底部炭化深度。

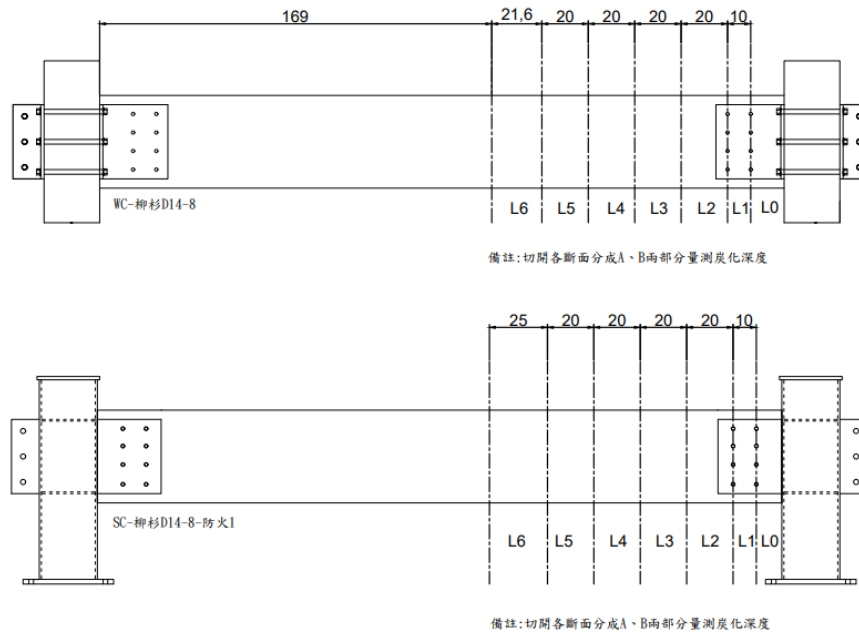


圖 3-44 梁橫切面位置

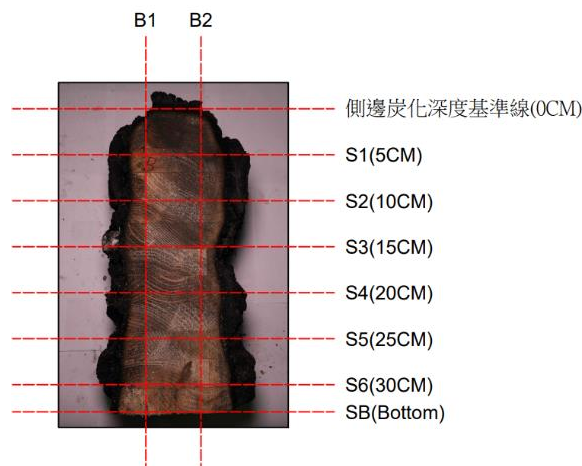


圖 3-45 切面梁側炭化深度位置

圖 3-46 為第一組 CW 試體的接合部及梁的切面照片，接合部的有效剩餘面積相較於梁斷面小，除了接合部的梁中央開槽以及摩擦栓鑽孔導致的斷面減損外，摩擦栓因為外端部暴露於火場，傳導的高溫使其內側周邊木材也形成炭化層，此炭化區域越靠近梁外側範圍越大，靠近梁

中心位置逐漸減少至維持一固定深度(圖 3-46(a))，同時梁的底側也因中央開槽關係使得高溫得以滲入中央，炭化區域遠較梁中央的底部位置深入許多(圖 3-46(a)上端)，甚至接合部底部一排摩擦栓周底部均已炭化，幾乎沒有健全的木材剩餘斷面，應已無法承擔與摩擦栓間的壓應力，將各位置的平均炭化深度以及根據實驗時間換算之平均炭化速率整理於表 3-2，L3~L6 等遠離接合部的側邊及底部平均炭化速率分別為 0.74 及 0.83mm/min，比規範[5]第九章的表 9.3-2 中的 0.7 與 0.78mm/min 稍高，而在接合部的 L0 及 L1 位置的側邊及底部平均炭化速率分別為 0.96 及 1.85mm/min，兩位置的炭化速度達到梁位置的 1.3 及 2.2 倍。



(a) L0 切面



(b) L6 切面

圖 3-46 CW 試體切面炭化深度

表 3-2 CW 試體各位置炭化深度及炭化速率量測結果

切面 編號	側邊平均炭化 深度(mm)	側邊炭化速率 (mm/min)	底部平均炭化 深度(mm)	底部炭化速率 (mm/min)
L0	50.25	0.95	100	1.89
L1	50.88	0.96	96	1.81
L2	41.65	0.79	61.75	1.17
L3	39.89	0.75	44	0.83
L4	39.0	0.74	43.25	0.82
L5	38.54	0.73	45	0.85
L6	39.96	0.75	44.75	0.84

圖 3-47 為第二組 CS_1 試體的切面照片，此試體採用噴塗 1 小時防火漆的鋼柱，接合部與梁的切面炭化範圍分布與第一組試體相近，接合部的摩擦栓孔的周圍以及梁的底部具有顯著的炭化現象，底部的摩擦栓底側幾乎完全炭化，無法支撐載重，在表 3-3 整理的炭化深度表格中，L3~L6 等遠離接合部的側邊及底部平均炭化速率分別為 0.75 及 0.76mm/min，而在接合部的 L0 及 L1 位置的側邊及底部平均炭化速率分別為 0.94 及 1.91mm/min 其結果也與第一組同樣採用柳杉集成材梁的試體相近。



(a) L0 切面



(b) L6 切面

圖 3-47 CS_1 試體切面炭化深度

表 3-3 CS_1 試體各位置炭化深度及炭化速率量測結果

切面 編號	側邊平均炭化深 度(mm)	側邊炭化速率 (mm/min)	底部平均炭化深 度(mm)	底部炭化速率 (mm/min)
L0	53.25	0.93	115.5	2.03
L1	53.75	0.94	101.25	1.78
L2	46.12	0.81	74	1.29
L3	43.86	0.77	44	0.77
L4	42.75	0.75	43	0.75
L5	42.21	0.74	43.5	0.76
L6	42.04	0.74	43.75	0.77

圖 3-48 為第三組採用花旗松集成材梁及具 3 小時防火漆噴塗的鋼柱接合部試體(PS_3)，由於花旗松的炭化速率較柳杉慢[5]，圖中顯示的炭化範圍較前兩組試體有明顯減小，接合部位置同樣在摩擦栓周圍出現炭化現象，底邊炭化深度較明顯，但整體的剩餘有效面積較多，此試體單排採用 3 支直徑 16mm 摩擦栓(雙排共 6 支)，圖 3-48(a)底部摩擦栓的下方仍有剩餘有效面積可供傳遞應力。表 3-4 中 L3~L6 等遠離接合部的側邊及底部平均炭化速率分別為 0.6 及 0.67mm/min，與規範[5]的第九章中的表 9.3-2 中對應木種的炭化速率相近，而在接合部的 L0 及 L1 位置的側邊及底部平均炭化速率分別為 0.75 及 0.78mm/min，各邊炭化速度達到梁位置的 1.3 及 1.2 倍。



(a) L0 切面



(b) L6 切面

圖 3-48 PS_3 試體切面炭化深度

表 3-4 PS_3 試體各位置面炭化深度及炭化速率量測結果

切面 編號	側邊平均炭化深 度(mm)	側邊炭化速率 (mm/min)	底部平均炭化深 度(mm)	底部炭化速率 (mm/min)
L0	45.3	0.76	48.0	0.80
L1	42.5	0.71	45.8	0.76
L2	36.9	0.61	42.0	0.70
L3	36.0	0.60	41.3	0.69
L4	36.4	0.61	38.8	0.65
L5	35.9	0.60	38.5	0.64
L6	36.3	0.60	40.5	0.68

圖 3-49 為第四組花旗松集成材梁與噴塗 3 小時防火漆鋼柱接合部試體(PS_C3)，由於接合部摩擦栓外側及梁開槽部分都有填塞 2 公分厚木塞防護，圖中接合部切面的摩擦栓孔幾乎沒有出現炭化現象，同時底部最下層位置摩擦栓下方仍然有保有有效殘留面積，由於試體採用兩排共 8 支直徑 14mm 摩擦栓，摩擦栓至梁底部距離為 80mm，第三組試體採用 6 支直徑 16mm 摩擦栓，距梁底部則有 100mm 距離，兩組在底部剩下的有效深度相近，顯見不論是摩擦栓外側或底部開槽採用遮蓋都能有效保護內部木材減少炭化區域。表 3-5 中 L3~L6 等遠離接合部的側邊及底部平均炭化速率分別為 0.63 及 0.68mm/min，與上一組試體相近，而在接合部的 L0 及 L1 位置的側邊及底部平均炭化速率分別為 0.69 及 0.75mm/min，接合部炭化速率較上一組沒有遮蓋的試體減少了 8%及 4%，而接合部側邊及底部的炭化速度約均為梁位置的 1.1 倍，兩者的差異相較於無遮蓋試體顯著降低。

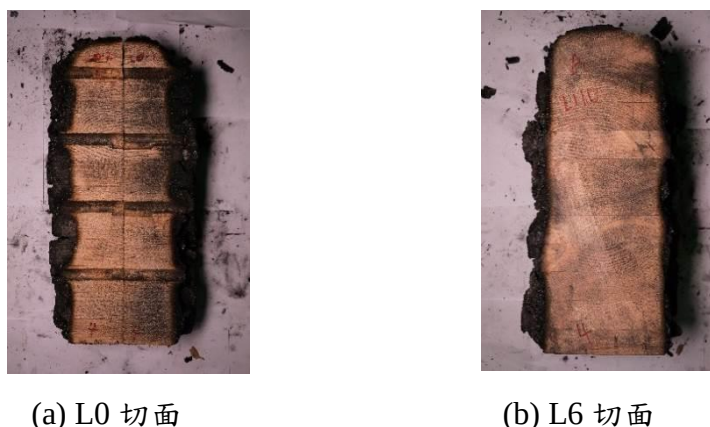


圖 3-49 PS_C3 試體切面炭化深度

表 3-5 PS_C3 試體各位置面炭化深度及炭化速率量測結果

切面 編號	側邊平均炭化 深度(mm)	側邊炭化速率 (mm/min)	底部平均炭化 深度(mm)	底部炭化速率 (mm/min)
L0	41.07	0.69	45.5	0.76
L1	41.25	0.69	44.0	0.73
L2	37.93	0.63	41.0	0.68
L3	37.64	0.63	42.3	0.70
L4	37.07	0.62	39.3	0.65
L5	37.57	0.63	41.0	0.68
L6	37.18	0.62	41.0	0.68

圖 3-50 為各組試體在接合部以及樑斷面的側邊以及底邊平均炭化深度，規範對於相關材種集成材的規定值亦整理於圖中，日本柳杉一小時炭化深度以 5 公分計算，第一、二組試體之 60 分鐘側邊炭化深度以平均炭化速度乘上 60 分鐘計算，底側炭化深度為實驗數值。各組試體在樑斷面上但炭化深度大致與規範值相近，接合部側邊以及底邊炭化深度比梁斷面大，第一、二組底邊炭化深度約為標準梁炭化數值兩倍，第三組(花旗松)側邊及底邊炭化深度比規範值大 17 及 24%。有遮蓋之接合部側邊及底邊炭化深度約較規範值大 10 及 18%。

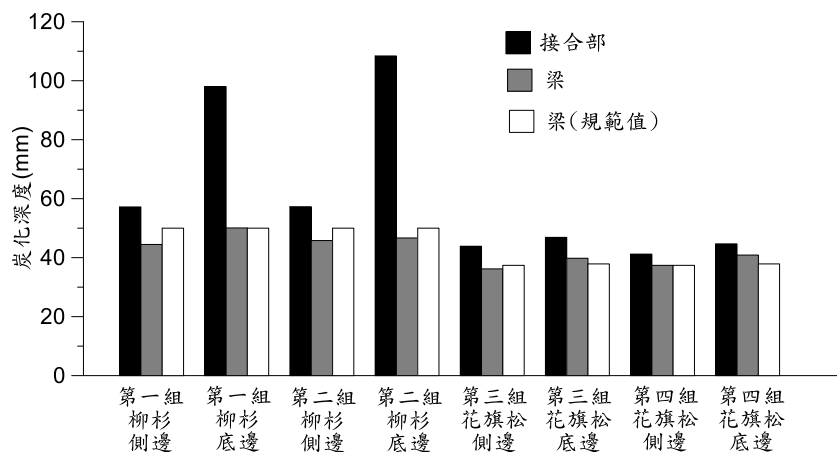


圖 3-50 接合部側邊及底邊炭化深度整理

接合部摩擦栓因外側暴露火場導致高溫沿摩擦栓傳遞至木樑內側，導致摩擦栓孔周邊炭化(圖 3-47、圖 3-48 等)，表 3-6 整理各組試體摩擦栓孔內側以及最外側處的炭化區域直徑，外側因為溫度較高導致炭化範圍的直徑較大，形成喇叭型炭化的分布，外側炭化直徑約為內側的 3 倍，而一到三組試體內側炭化直徑約為各自摩擦栓直徑的 1.4、1.7 以及 1.4 倍，而使用遮蓋的第四組試體則摩擦栓孔未發生炭化現象(圖 3-49(a))。

表 3-6 摩擦栓周邊炭化直徑(單位: mm)

試體	摩擦栓直徑	外側炭化直徑	內側炭化直徑
第一組	14	66.1	19.9
第二組	14	71.4	23.8
第三組	16	72.1	21.7
第四組	14	-	-

第四章 接合部結構實驗

第一節 接合部結構試驗規劃與設計

結構實驗目的主要驗證耐火試驗後接合部的剩餘強度以及健全接合部的結構性能，後者依照耐火試驗試體，設置了三組對應的結構接頭試體，表4-1為試體以及實驗參數，CW_S 對應耐火試驗第一組柳杉柱梁接合試體，PS_S 及 PS_CS 對應耐火試驗第三、四組試體。其中 PS_CS 的摩擦栓考量遮蓋深度，與第四組耐火試驗試體同樣採用長度16公分長、直徑14mm、8根的摩擦栓設置。實驗利用成大建築系結構實驗場的反力框架，試驗加載系統如圖4-1，將接合部轉90度放置，於梁上端部以千斤頂利用位移控制方式加載，底端水平向的柱則與底部基礎梁固定，防止翹起或移動，圖4-2為火害測試後接合部強度實驗照片。

表4-1 結構實驗試體以及參數表

試體	GLT 材種	扣件防護	對應火害試驗試體	實驗方法
CW_S	柳杉	No	CW	靜態反覆加載
PS_S	花旗松	No	PS_3	靜態反覆加載
PS_CS	花旗松	Yes	PS_C3	靜態反覆加載

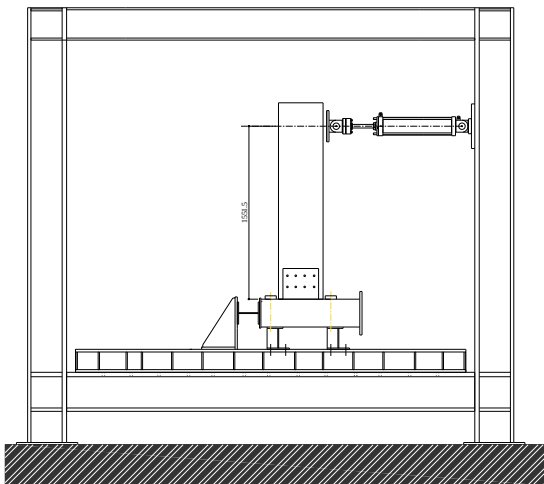


圖 4-1 試驗體以及加載系統



圖 4-2 試驗體加載照片

第二節 試驗結果與剩餘強度

火害接合部強度試驗：

四組接合部試體的側推試驗結果如圖 4-3，由於千斤頂施力位置距離柱表面為 145 公分，因此各組接合部試體至少被強制變形至 10%的轉角，柳杉集成材梁-集成材柱接合部試體在組裝時即可發現接合部鬆弛現象，8 支摩擦栓幾乎都可輕易抽出，試驗過程中可目視梁接合部最下緣沿著兩摩擦栓恐發生劈裂破壞，試驗結束後將此劈裂區域剝除發現斷面大部分已炭化，因此對於整體的力量變形曲線無顯著影響，同時驗驗結束後仍有大部分摩擦栓可輕易抽出且維持原狀無彎曲現象，且摩擦栓周圍亦有顯著炭化現象，此造成孔隙變大且炭化層承载力低，因此強度曲線在初期出現力量為零的滑移段。第二組為柳杉集成材梁與鋼柱接合部試體(CS_1)，其強度以及初期勁度明顯較高，但在加載初期與第一組試體相同出現試體變形但無抵抗反力的情形，摩擦栓周圍木材可能同樣也發生局部炭化現象，試驗過程發生數次劈裂並伴隨明顯聲響，但因外層被炭化層覆蓋，其損傷位置不易判別，最終實驗結束後接合部的梁下緣炭化部分可輕易剝除至底層摩擦栓位置(圖 4-4)，可見周邊僅在相鄰水平(圖中為垂直)摩擦栓間有木材未炭化部分，而摩擦栓本身沒有變形。第三組試體為花旗松集成材梁-鋼柱接合部試體(PS_3)，採用直徑較大的 16mm 的摩擦栓六支，試體強度亦有明顯提高，初期同樣有出現滑移段，其距離約為 10mm，較前一組試體(40mm)明顯減少。最後一組試體(PS_C3)在加載初期沒有出現滑移段，此應為摩擦栓周邊木材沒有炭化，維持與木材接觸狀態，受壓時能夠即時傳遞應力，同時其勁度及強度為四組試體中最高，此組試體在梁兩側面各採用 2 公分厚的摩擦栓遮蓋，摩擦栓有效長度較短，設計上採用 8 支直徑 14mm 摩擦栓以接合部強度與前一組試體相近，但兩者火害實驗後的強度有明顯不同，使用防火遮蓋的接合部剩餘性能明顯優越許多。

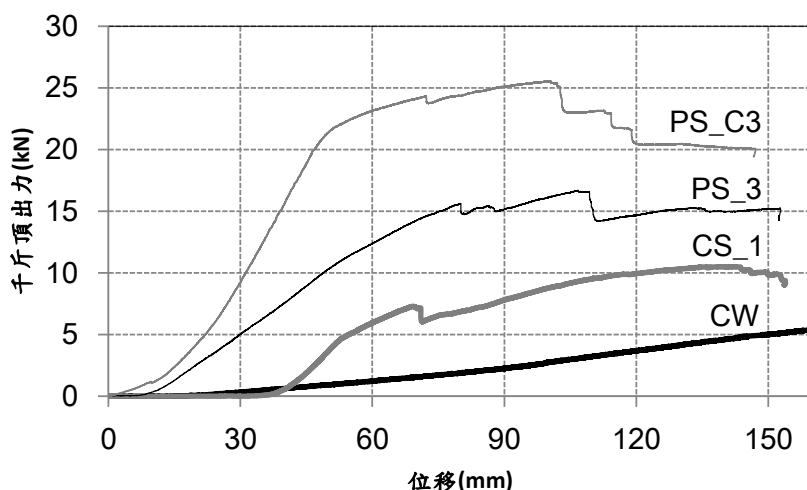


圖 4-3 火害接合部側推試驗結果



圖 4-4 CS_1 試體試驗破壞照片

表 4-2 整理各組試體的降伏強度與試驗過程中記錄之最大強度，採用鋼柱的第二組試體最大強度為採用木柱的第一組試體的 1.5 倍，同時接合部的初始勁度也有明顯提升(圖 4-3)。而採用木栓作為防火遮蓋的第四組試體剩餘最大強度為未採用遮蓋的第三組試體的 1.5 倍，採用防火遮蓋的接合部在一個小時耐火試驗後具有較高且可靠的接合性能。彎矩為千斤頂出力與千斤頂至摩擦栓群中心點距離的乘積。

前三組火害試體(CW、CS_1 及 PS_3)由於木梁底部開槽處未沒有遮蓋，因此高溫可從此處深入木梁，使得木梁底端炭化範圍較大，造成最底側摩擦栓的承壓面積大幅縮小，影響接頭強度。再設計時若摩擦栓或其他金屬扣件的緣距足夠的前提下，將扣件以及木梁中的連接鋼板往上(樓板方向)偏移，應可遠離高溫的影響，使得底部的摩擦栓下方有較多的木材剩餘面積。此方式與歐洲規範[9]中對於夾在木板中的鋼板的保護深度的考量方式一致。

表 4-2 火害接合部剩餘強度

試體	降伏強度(kN)	最大強度(kN)	降伏彎矩(kN-m)	最大彎矩(kN-m)
CW	4.5	7.2	5.7	9.1
CS_1	4.8	10.5	6.2	13.5
PS_3	14.1	16.6	18.2	21.5
PS_C3	22.3	25.5	28.8	32.9

火害接合部強度剩餘強度評估：

木材炭化後強度甚低，木材表面炭化將減少木梁有效寬度，影響木材傳遞剪力至摩擦栓的承載強度，在單一接合部的抗剪強度計算中(梁斷面參數詳見圖 4-5)，有效長度(l)須扣除側邊炭化深度(t_c)，因而在計算接合部係數 C 應採用修正後有效長度(l')計算並以各模態最小值(C')計

算降伏抗剪強度及極限抗剪強度(式 1~5)，式中 d 為摩擦栓直徑(mm)， F 與 F_e 為摩擦栓金屬強度以及木材承壓強度，由於摩擦栓火害後強度會降低(強度降低係數 R_t)，而鋼材標稱強度與實際強度間存在差異，其比例關係稱為材料超強因子(α)，一般約為 1.2 左右，因此鋼材強度修正式中(F')將兩者關係導入， r_u 為極限強度比，根據不同金屬扣件型式有所差異，摩擦栓的 r_u 值為 1。

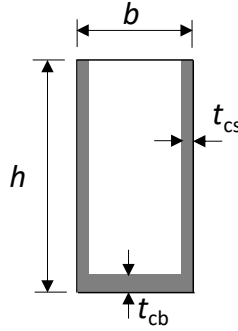


圖 4-5 梁斷面參數

$$l' = l - 2t_c \dots\dots\dots(1)$$

$$F' = F \cdot \alpha \cdot R_t \dots\dots\dots(2)$$

$$\gamma' = F'/F_e \dots\dots\dots(3)$$

$$P_y = C' \cdot F_e \cdot d \cdot l' \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{極限剪力強度 } P_{uo} = \gamma_u \times P_y \dots\dots\dots(5)$$

在整體接合部強度計算中，須考量靠近梁底部摩擦栓在火害後剩餘的有效端距及有效邊距在扣除梁-柱接合介面以及梁底部炭化深度後是否足夠，在行計算整體接合部強度，此外針對割裂、剪力破壞的檢核過程也需考慮梁底部的炭化深度影響，其建議的修正方式如下，式中 P_{uj} 為基於前述單一接合部的降伏強度、金屬扣件列數以及單列中扣件數量韌性係數等求得，下列計算中需要根據炭化深度修正的係數為修正的梁深度 h' ，其為原來梁深度扣去底部炭化深度所得，底部金屬扣件深度 h_e' 則需要視火害後底部金屬扣件是否有足夠的緣距，若不足夠則以鄰近金屬扣件取代較為保守，以下所得之 P_{uo} 為整體接合部極限抗剪強度。

$$P_{uw1} = 2 \cdot C_r \cdot l \cdot \sqrt{\frac{h_e'}{1 - \frac{h_e'}{h'}}} \times n \dots\dots\dots(6)$$

$$P_{uw2} = \frac{2}{3} \cdot \xi \cdot h_e' \cdot l' \cdot F_s \dots\dots\dots(7)$$

$$P_{uw} = \min\{P_{uw1}, P_{uw2}\} \dots\dots\dots(8)$$

$$P_{uo} = \min\{P_{uj}, P_{uw}\} \dots\dots\dots(9)$$

由於木結構接合部為半剛性接合，多數設計僅考量剪力的檢核，因本計畫中針對火害試體進行抗彎試驗檢核其剩餘強度，因此列出彎矩計算計算方式。圖 4-6 為以計畫接合部金屬扣件排列型式所繪製的接合部彎矩計算示意圖，以金屬扣件群的中心假設為旋轉中心，各單一接合部負擔的剪力乘上該接合部與中心距離(力臂)則為單一接合部對於抵抗彎矩的貢獻，因此越遠

端的受力越大，較早進入降伏，基於計算整體接合部的最大抵抗彎矩，因此各個單一接合部的反力都以其降伏剪力計算，為各反力都與木纖維方向不同，因此應根據夾角 θ 來計算 ${}_0P_y$ ，再根據各自的力臂大小，乘積的總合做為接合部的最大抵抗彎矩(式 11)。表 4-2 為根據各式所計算之彎矩強度，對於第一及第二組試體，由於底層的摩擦栓底部木材幾乎完全炭化(圖 3-36 及圖 3-37)，因此此列摩擦栓貢獻不納入計算，相應的參數如摩擦栓數量以及底層摩擦栓深度等參數據此修正，計算強度與表 4-3 所整理的實驗強度比較，第一及第二組的計算結果介於實驗降伏彎矩與最大彎矩之間，第三及第四組試體的計算值則與降伏彎矩較為接近，四組的計算值都比實驗的最大強度保守。

$${}_0P_y = C' \cdot {}_\theta F_e \cdot d \cdot l' \dots\dots\dots(10)$$

$$M_{dp} = \sum_{i=1}^n {}_{\theta i} P_y \times R_i \dots\dots\dots(11)$$

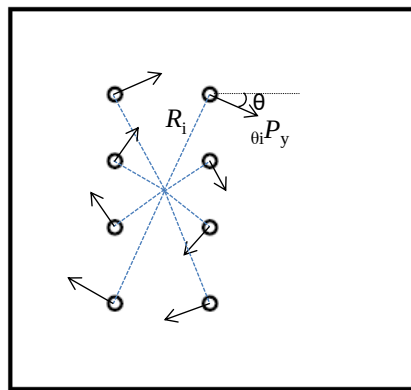


圖 4-6 接合部彎矩計算示意圖

表 4-3 火害接合部各參數及評估強度

試體	t_{cs} (mm)	t_{cb} (mm)	P_{uw1} (kN)	P_{uw2} (kN)	$\perp P_{uj}$ (kN)	P_{uo} (kN)	M_{dp} (kN-m)
CW	46.3	79	70.8	52.2	78.8	52.2	7.6
CS_1	50	87.2	71.1	48.6	73.3	48.6	7.4
PS_3	40	44	104.2	80.6	93.7	80.6	14.3
PS_C3	39.6	42.5	125	86.8	99.8	86.8	16.6

健全接合部強度試驗：

圖 4-7 至圖 4-9 為三組健全接合部試驗照片及其實驗結果，遲滯迴圈圖縱軸以及橫軸分別

為千斤頂出力以及其位移，圖 4-7 的第一組 CW_S 試體對應火害試體為第一組的 CW 試體(圖 3-21)，此試體在反覆試驗中顯示因為木材非線性的壓縮變形產生在強度方面的壓縮效應 (pinching)，正負方向的行為大致對稱，最大強度在正向達到 25.7kN，初始勁度為 0.37kN/mm，與圖 4-3 的對照 CW 試體對比，其剩餘最大強度 7.2kN，一小時火害後接合部的抗彎強度減為原來的 28%，健全試體在 10%的變形時可發現梁的一端與木柱接觸而產生額外的支撐力道，而火害試驗因為在梁與柱的接觸面已大部分炭化，因此僅有摩擦栓接合部產生的抵抗彎矩，此外因為炭化導致木材承壓面積減損也是主要強度降低的原因之一。



圖 4-7 CW_S 試體實驗照片與力量-變形遲滯迴圈

圖 4-8 為第二組採用花旗松集成材梁與鋼柱接合，其對照火害試體為圖 4-3 中的 PS_3 試體，此試體的最大強度以及旋轉勁度分別為 56.9kN 及 1.59kN/mm，兩者相較於前一組木柱木梁接合部試體，分別提升了 2.2 倍及 4.3 倍，由於插入梁中心的剪力鋼板係以焊接方式與鋼柱固定，相較於 CW_S 試體的 T 型簡歷鋼板透過螺栓鎖在木柱上，受旋轉彎矩時鋼板會在柱表面造成垂直纖維方向局部受壓的受力型態，呈現柱端接合部與梁端接合部兩個旋轉彈簧串聯的狀態，而第二組試體鋼柱端用焊接接合剪力鋼板形成剛接的型式，使得鋼柱木梁接合部的強度與勁度大幅提升。本組試體與火害試驗的對照試體 PS_3 相比，火害後強度降至 16.6kN，強度約降低了 70%，此衰減情形與前一組試體相近。

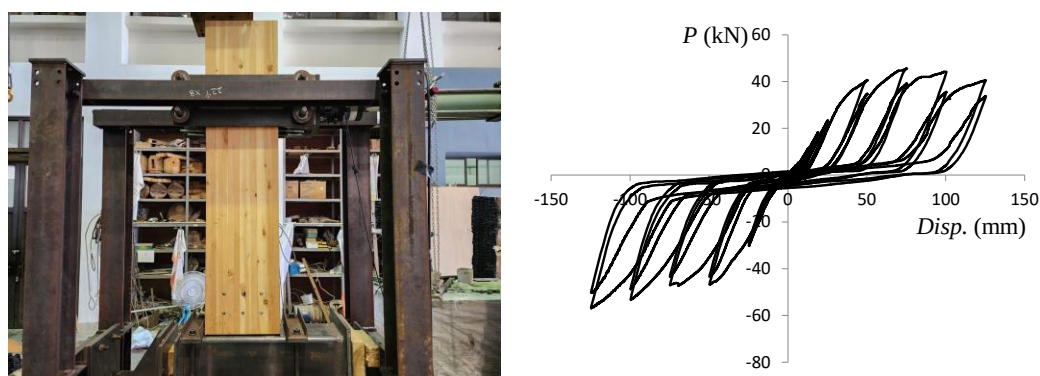


圖 4-8 PS_3 試體實驗照片與力量-變形遲滯迴圈

圖 4-9 為第三組相同採用花旗松集成材梁與鋼柱接合，但摩擦栓外側以及木梁底部開槽處外側部份用木塞遮蓋，因摩擦栓承壓長度減少因此設計時減少斷面尺寸以及增加數量方式使強

度維持相近，故此試體採用直徑 14mm 摩擦栓 8 支，其對照火害試體為圖 4-3 中的 PS_C3 試體，此試體的最大強度以及旋轉勁度分別為 51.7kN 及 1.25kN/mm，兩者相較於前一組鋼柱木梁無遮蓋接合部試體十分接近，此與設計結果吻合，此外與火害對照試體 PS_C3 相比，1 小時耐火試驗最大強度由 51.7kN 降到 25.5kN，約降低了 50%，相較於無遮蓋試體，強度降低情形較為緩和。圖 4-11 為實驗結束時接合部木梁開裂情形，開裂集中於兩側，沿木紋裡方向貫穿摩擦栓孔位，此開裂自 4% 變形時開始出現，隨加載振幅增加而逐漸明顯並延伸。

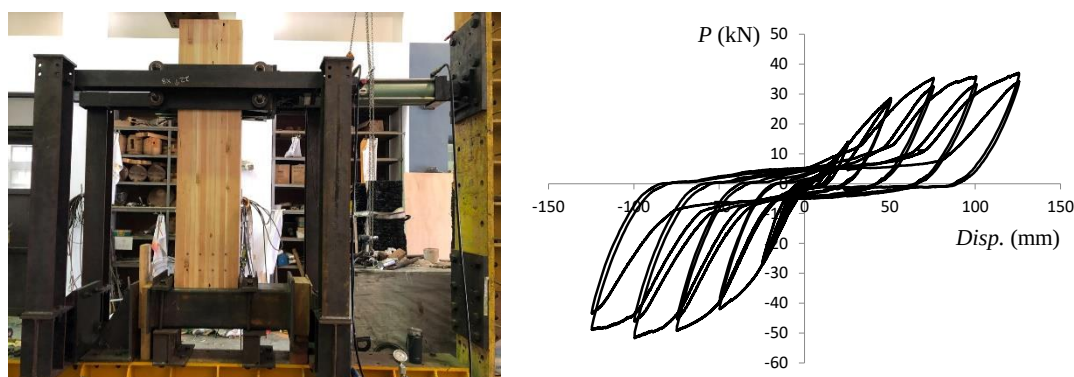


圖 4-9 PS_CS 試體實驗照片與力量 - 變形遲滯迴圈

表 4-4 整理火害試體及健全試體的最大強度以及初始勁度，在健全試體中最大強度係正負向的最大值平均而得，其平均初始勁度亦是以相同方式取得。健全試體的最大強度以及勁度均比其對應的火害接合部試體高，未做遮蓋的第一組及第三組試體火害後的強度約為對應的健全試體的 3 成，而有遮蓋試體剩餘強度仍有接近 6 成，勁度亦呈現相同趨勢，無遮蓋試體剩餘勁度(火害試體初始勁度/健全試體初始勁度)約為 13~16%，而有遮蓋試體仍有 67% 以上，有遮蓋的接合部剩餘結構性能明顯高出許多，可見接合部鐵件的遮蓋有無不僅顯著影響接合部區域的炭化範圍，進而也影響了接合部剩餘結構性能。

表 4-4 接合部結構性能整理

	火害試體 最大強度 (kN)	健全試體 最大強度 (kN)	火害試體 平均初始 勁度 (kN/mm)	健全試體 平均初始 勁度 (kN/mm)	強度衰減 比例(%)	勁度衰減 比例(%)
CW	7.2	23.5	0.04	0.306	30.6	13.0
CS_1	10.5	-	0.326	-	-	-
PS_3	16.6	51.3	0.246	0.324	32.4	15.9
PS_C3	25.5	44.2	0.626	0.576	57.7	67.3

第五章 結論與建議

第一節 結論

一、建立使用國內外集成材梁(柳杉、花旗松集成材等)與鋼結構柱接合部之標準耐火實驗驗證、防火時效資料及設計方法。

1. 本研究設計四組純木結構以及鋼柱木樑的複合結構的接合部試體，在施加固定荷重條件下，以標準一小時耐火試驗評估其耐火性能，同時以結構試驗評估火害後接合部的剩餘強度以及健全接合部的結構性能，了解接合部在火場中的燃燒特性並了解施加各種不同耐火對策後對其耐火性能的影響。結果顯示，集成材梁柱的純木構接合部試體採用目前業界常見的接合形式，由於在梁下端留有較大開口，試驗中高溫竄入接合部內側，使得梁與木柱接合面區域起火，木梁側邊對於 T 型剪力鋼板的保護層完全炭化，同時木梁內部摩擦栓周邊木材也因傳導的高溫而炭化，靠近梁表面區域炭化範圍較大，而接合部底部的炭化範圍與最底側摩擦栓周邊炭化區域串連，使得此處炭化深度超過 10 公分，達規範的炭化深度兩倍，使得最下層摩擦栓失去承载力，炭化情形在四組試體中最為嚴重。
2. 兩組鋼柱集成材樑接合部試體的炭化區域相近，同樣在摩擦栓孔有炭化現象，由於炭化後壓強度降低，使得在接合部剩餘強度試驗中，與純粹木構接合試體相同在力量加載初期產生位移滑移但力量仍維持為零的現象，接合部在此階段呈現鉸接的行為。此外，若鋼柱表面採用 3 小時防火漆取代 1 小時防火漆噴塗，能夠將梁內側剪力鋼板表面溫度自 400 度左右降低至約 200 度，此時樑內側與剪力鋼板接觸之木材則未發生炭化。
3. 在摩擦栓外側以及梁底部開槽處以兩公分厚木塞遮蓋試體的火害實驗結果顯示，梁內摩擦栓周圍幾乎未發生炭化，同時梁下緣炭化深度也受到抑制，木材遮蓋能夠大幅降低接合部炭化面積。此外，各組試體在接合部的炭化深度與速率都比梁斷面高，其中尤以採用柳杉的第一組及第二組試體最為明顯，側邊以及底邊的炭化速率分別為梁斷面的約 1.3 倍及 2.2 倍，第三組試體的鋼柱雖使用 3 小時防火漆噴塗，側邊及底邊炭化速率約為梁的 1.3 及 1.2 倍，因此若未實施外側遮蓋，接合部的耐燃厚度應適當增加。若與規範的一小時炭化深度比較，第一、二組日本柳杉接合部底邊炭化深度約為標準值兩倍。花旗松未遮蓋接合部試體側邊及底邊分別比規範值大 17 及 24%，有遮蓋時則略降為 10 及 18%。
4. 未做遮蓋的第一組及第三組試體火害後接合部的強度約為對應的健全試體的 3 成，而有遮蓋試體剩餘強度接近 6 成，勁度亦呈現相同趨勢，無遮蓋試體剩餘勁度約為 13~16%，而有遮蓋試體仍有 67% 以上，有遮蓋的接合部剩餘結構性能明顯高出許多，可見接合部鐵件的遮蓋有無不僅顯著影響接合部區域的炭化範圍，也保留較高的結構性能，設計上應在接合部的扣件外側以及開口處以遮蓋或其有效防止高溫傳到至接合部內側的方式進行防護。

二、研提集成材與鋼結構接合部火害後之殘餘結構性能評估建議方法。

由於炭化區域無法負擔荷重，接合部剩餘強度計算應扣除表層炭化深度，採剩餘的有效承載面積計算，同時也需視現況評估最底側金屬扣件底部的木梁炭化情形，決定該處扣件周邊木材能否提供預期強度，本研究據此原則提出的計算式以及計算結果大致於實驗結果的降伏強度相近，但低於最大強度，計算結果偏向保守，可用以估算剩餘剪力強度。

第二節 建議

建議一：

木構造建築物設計及施工規範第九章增加接合部耐火設計內容：立即可行建議

主辦單位：內政部建築研究所

協辦單位：內政部國土管理署

本研究的成果顯示接合部的五金扣件以及開口處做遮蓋能夠有效降低炭化的深度及範圍，同時也對維持火害後剩餘強度有顯著幫助，可在木構造建築物設計及施工規範之第九章增加接合部防火設計的小節，補充接合部施做耐火遮蓋的成效、耐火設計的方式、增列建議作法及圖例。後續規劃於明年度執行直交集成板(CLT)樓板與牆板接合部之防火性能評估。

建議二：

建議透過實驗研究補足接合部耐火設計相關參數：立即可行建議

主辦單位：內政部建築研究所

協辦單位：內政部國土管理署

由於接合部種類多元，且未來有木結構高層化的需求，接合部適合採用的遮蓋厚度、尺寸及施作方式等依各別案例將有所不同，建議透過系統化的實驗研究，獲得供耐火設計使用的可靠數值，相關量化成果可增列於木構造建築物設計及施工規範之第九章。

建議三：

建議投入火害後修復與性能補強之技術研究：中長期建議

主辦單位：內政部建築研究所

協辦單位：內政部國土管理署

透過本研究的實驗成果可知火害會顯著降低接合部的強度與勁度，目前國內木造建築數量逐年增加，加上未來木造建築高層化趨勢，對於火害後修復與性能補強之相關技術有更迫切需求，因此本研究團隊建議先收集國內外相關文獻，同時以實驗研究方式評估各種技術的性能並且得到量化成果供實務使用，亦可將相關的木造建築火害修復補強技術成果編輯出版。

附錄一、 期初審查會議記錄

評選會議評選委員意見及廠商回應一覽表

	委員評選意見	廠商回應
1	請補充說明本案梁柱接頭耐火試驗規劃之可行性。	試體兩端鋼柱的頂部(在火爐外側)設置吊接點，在實驗場天車(或租用吊車)吊接狀態下進行耐火試驗，耐火實驗結束後天車吊起試體移至實驗室聯外鐵門附近噴水滅火，約耗時5分鐘。預先製作試體放置鋼底座，試體與底座固定後，透過天車將梁上方配重塊吊離，再對梁以及接頭部位切面觀察。另外，為增快滅火速度，考慮採用耐火石膏板取代會燃燒的 CLT 樓板。
2	本案 GLT 之材種為柳杉及花旗松，這些炭化深度規定已在現行木構造規範第9章有要求，本案炭化深度量測目的為何？且 CLT 板之材種是否與 GLT 相同？是否同時量測其炭化深度。	本案炭化深度主要探討接合部位因為金屬扣件外露導致高溫透過扣件傳遞至梁內部，使得炭化深度及範圍擴大的情形，希望透過實驗後接合部為的切面瞭解其剩餘斷面與梁斷面的差異。並且評估使用木栓遮蓋扣件外側後，接合部炭化範圍減低情形，透過實驗紀錄之炭化範圍以及木栓的耐火效果，可提供耐火設計時參考。目前規範僅針對構件斷面耐火厚度部分有所規定，對於接合部防護並未有實際量化數據供參考。實驗同時記錄梁斷面的炭化深度，主要目的是與接合部的炭化深度情形作比較。 CLT 板預計採用柳杉 CLT 板，其設置目的為模擬樓板存在時梁及接合部受三面火害的情形，實驗後也會觀察記錄炭化深度。
3	本案接合部之金屬扣件是否為本土製品還是國外產品？	本案螺栓等扣件為國產，鋼柱木梁連接件亦為國產，與鋼構一併於工廠內製作焊接完成。木柱-木梁接合部試體使用的連接件將參考市面上使用國外連接件型式，請鐵工廠加工製作。

4	本案火害後梁柱接頭之殘餘強度如何評估?	火害試體將從跨距中間將梁切開，一側的梁柱接頭處的斷面切開，評估剩餘的有效斷面，而另一側的梁柱接頭則以單側加載的抗彎試驗評估其旋轉勁度以及強度，透過剩餘有效斷面計算的強度結果與抗彎實驗所得的實驗結果比對修正，將可得到較為可靠的強度計算方式。各組試體都將依此方式進行評估。
5	本案試驗規劃於7、8月，請配合本所防火實驗中心實驗排程。	已預約並且排入中心7月份的實驗排程。
6	實驗設計以縮短螺栓長度或摩擦栓長度以避免火害，在實務上是否可行?因為還未火害前，木梁接合強度就需先折減了，是否經濟?	扣件未遮蓋試體的耐火設計係結構斷面設計完成後扣去炭化深度評估其剩餘有效斷面能否滿足短期荷重要求，而扣件外側遮蓋試體是不改變摩擦栓的荷重長度的情形下，梁的寬度增厚以滿足所需填塞木栓的厚度。此設計因為不改變摩擦栓長度，強度不會折減，但會增加材積，雖然較不經濟，結構強度以及耐火安全較為重要。
7	螺栓與摩擦栓的尺寸為何?未見於服務建議書，其細長比為影響 Yielding Model，因試材樣本不多，如何控制 Yielding Model?	梁斷面尺寸預計為210X420，摩擦栓直徑預計使用12mm，根據耐火設計等細節確定後尺寸可能還會更動，計算上此雙剪類型接頭將達到第三降伏模態為前提。
8	鋼木接合實為半剛結合，火害的結合效率是否會改變?反而是比較要注意的部分。	未在扣件外側遮蓋的試體，炭化區域可能沿著扣件往木材內部延伸，進而導致結合強度(效率)降低，這部分會在火害實驗後透過切面以及強度試驗進行量化評估，對於在扣件外側設計遮蓋的試體，因為在梁的寬度方向增加木栓的厚度(三公分)，火害前的接頭強度(效率)不會有降低，火害實驗後對接頭強度的影響應較無遮蓋的接頭試體小，火害實驗後的強度試驗能做剩餘強度的比較。
9	集成材尺寸?	斷面尺寸預計為210X420，根據耐火設計等細節確定後尺寸可能還會更動。
10	計畫目的為何?預期效益是否能達成“防火時效性能評估”?	試驗目的其一是了解接合部位，透過火害實驗後接合部切面的剩餘有效面積以及火害接頭的強度試驗，評估是否滿足耐火設計時的強度要求，獲得

		耐火時效性能的評估方式。
11	本研究計畫是否有上位的“整體計畫”?是否有後續研究所需之規劃為何?	本研究計畫預計為多年期的計畫,後續有針對 CLT 接合部的耐火性能以及等相關的研究規劃。
12	本研究計畫火害實驗部位為端部或中間段?研究成果是否能驗證“防火時效”的性能評估?	本計畫火害實驗主要著重在梁端部的接合部位的耐火性能。研究成果將會量化討論有無設計扣件遮蓋對於接頭區域炭化深度影響以及剩餘強度,將能驗證是否滿足防火時效的要求。
13	本案建議可從較常見接合部之做法、種類、目的規劃進行相關實驗。	感謝委員建議,將以業界常見的接合部作法作為實驗規劃的依據。

附錄二、 專家會議記錄

第一次專家座談會議紀錄

委員	委員意見/建議	研究團隊回應
王教授 松永	鋼結構受高溫會影響強度所以需要施作防火漆，應該注意防火漆施作位置以及範圍。	感謝委員意見，根據規範木構造防火設計施工參考手冊以及國外規範都建議，接合部鐵件應有適當防火被覆、遮蔽或者應置於木構件安全斷面內。試體中除了位於木樑中心的剪力鋼板不噴塗防火漆外，鋼柱四周暴露在外側部分都會噴塗防火漆。
林教授 慶元	1.試體在樓板上挖孔後來導致火從孔中冒出中止試驗。在樓板上挖有無必要性? 2.防火漆噴塗範圍如何，接合部鐵件上也需要噴塗嗎?防火漆膨脹是否會影響接合部性能? 3.市售柳杉有多種名稱跟來源，有國產柳杉、日本柳杉等，研究所使用的是哪一種柳杉應說明清楚。 4.實驗中為何用輕質混凝土樓板而不是使用 CLT 樓板?	1.感謝委員意見，輕質混凝土樓板因為剛度大不隨木樑變形，因此千金頂施加的垂直載重需要直接加載在木樑上，不得已採用樓板局部開孔方式，未來將會縮小開孔範圍以及在開孔周邊填塞充足防火棉以免火源冒出。 2.暴露於火場中的鋼柱都會噴塗防火漆，但是位於木樑中心的剪力鋼板因為處於木材內側，因此未予以噴塗，可避免因為防火漆因為膨脹影響接合部性能。 3.本案採用日本柳杉，將會在報告中補充說明。 4.由於柳杉 CLT 版製作時間較久，趕不及實驗期程，因此折衷採用輕質混凝土樓板，為使樓板能順應木樑撓度一起變形，局部的輕質混凝土單元板間採用填塞防火棉，而非採用膠合方式續接。
蘇建築 師鴻奇	1.防火漆的耐久性如何?有無相關證明? 2.鋼柱防火漆的噴塗範圍應如何界定?	1.感謝委員意見，目前市售防火漆或施作廠商似乎無法提供長年的耐久性保固或證明。 2.鋼柱會焊接剪力鋼板等鐵件跟木樑接合，鋼柱噴塗範圍為暴露於外側的或是有

		可能受高溫影響範圍，所以主要包含了鋼柱的四周表面，剪力鋼板等安裝於木樑內側受到保護的部分則不噴塗。
李 董 事 長岳峰	1.結構鋼種中 SN 系列因為單價較高，實務上使用較少，建議實驗可採用 SS 系列或 A36 等系列鋼材較為普遍。	感謝委員意見，目前的試體中除鋼柱之外都是使用 SS400 鋼種，未來相關的研究也會以市售常見鋼種為主。
雷 明 遠 研究員	國外有發展接合部或構件的耐火實驗設計檢核程式，團隊可以基於研究成果發展此類型的設計軟體，可透過技轉供業界使用。	感謝委員意見，會往這個方向努力。
詹 家 旺 助 理 研 究 員	目前實驗進度落後，建議老師加快速度。	感謝委員意見，因為已經完成一組試驗，剩下的實驗進度會加快。
王 組 長 順治	1.建議在書面報告可以詳細描述複合系統的優點。 2.應該思考實驗成果的呈現方式，以及如何反應在規範的修訂上面。	1.感謝組長意見，在報告書中會詳述複合系統的優點。 2.將會基於目前實驗結果，反應在規範中，例如接合部防火的施作建議或是防火漆的噴塗範圍等建議上。

第二次專家座談會議紀錄

委員	委員意見/建議	研究團隊回應
盧昭宏 科長	1.2 公分遮蓋的施作方式如何? 2.接合部施作遮蓋、防火漆成本? 3.防火漆的有效性以及耐久性如何? 4.接合部除了遮蓋之外，有無其他提升耐火性能的方法?	1.本研究遮蓋方式係利用集成材樑加工剩餘料加工成 2 公分厚的圓木塞以及方木條，用木工膠水將其填塞在摩擦栓外側預留空間以及接合切縫開口處。 2.上述遮蓋成本很低，但鋼構的防火漆成本較高尤其是噴塗 3 小時防火的部分，可以考慮鋼柱僅在接合部區域噴塗 3 小時防火時效的防火漆。 3.防火漆材料有經過防火測試認證，但耐久性的部分則沒有相關的資料。 4.可考慮國外耐火集成材的方式，內層夾一層耐燃材料，可有效提升耐火時數。
王松永 名譽教授	接合部底部的炭化深度超過 10 公分，側邊的炭化深度也高於預期，為何柳杉的接合部會有這麼高的炭化深度，是日本柳杉還是台灣柳杉，另外未來設計時應如何考慮接合部的炭化深度。	實驗採用日本柳杉集成材，因為摩擦栓孔周邊木材也發生炭化，進而與樑下端碳化區域連結，導致底部的炭化深度超過 10 公分。因此設計時盡量採用遮蓋或其他方式防止高溫透過扣件傳遞至內側外，底部的摩擦栓位置應該要留較大邊距，以避免上述情形發生。
莊智勝 教授	實驗以木材蓋在螺栓等鐵件上面，有無可能以防火材來取代，可能得到更好效果。	以防火材遮蓋扣件或是接合部開口應能得到更好的高溫防護效果，其量化的成效有賴未來以實驗方式驗證。
李岳峰 董事長	1.歐洲或其他國慢慢以不露出鐵件的方式來設計，這是否可以作為後續的研究方向。 2.目前歐美日都已經在做兩小時接合部防火時效，未來國內木造建築樓層數拉高勢必面臨結構以及接合部防火性能問題，建研所是否能夠支援後續的相關研究。	1.可以參照國外的施作方式配合國內設計習慣，提出對接合部有效且業界容易採用的方式。 2.相關課題仍有許多課題需要了解以及克服，希望未來能夠有持續性的研究。

張元耀 總經理	希望計畫趕快完成，讓成果納入法規，讓業者能夠引用參考。	謝謝委員意見。
蔡孟政 結構技師	1.根據實驗結果接合部反而在與鋼材接觸位置的炭化情形反而更嚴重，未來在設計的時候，如何設定強度折減設計可供業界採用？ 2.研究最後的建議中提到可以將接合部往上提升使得鋼板遠離外側，這個提升量有無建議值？	1.若採用遮蓋方式，摩擦栓孔周邊不會炭化，各組單元接合部在扣除外側炭化深度後剩餘有限斷面可用於檢核剩餘強度，但是未施作遮蓋保護的接合部，則因摩擦栓孔碳化使得接合部剩餘強度以及勁度較難準確評估，根據實驗結果，前者可剩餘70%左右的強度，後者僅剩30%。 2.可參照歐洲規範中對於木材中心鋼板的保護設計以及扣件離樑底部的邊距來決定。
雷明遠 研究員	1.研究中做了不少國內首次執行實驗，另外接合部也做了結構實驗，建議可以加強描述其實驗結果。 2.國外規範中有無GLT和鋼構接合的內容？若有文獻的話應該盡量收集。 3.結論部分建議有參照規範角度來寫此複合結構接合部應如何施作。 4.遮蓋施作方式建議補充說明。	1.已於該實驗章節補述。 2.據了解國外沒有針對鋼柱與集成材樑接合部的相關規範規定，但有相關的研究，將補充於文獻回顧章節中。 3.謝謝建議，將會依照此方式撰寫。 4.文中將會補充說明遮蓋施作方式。
王順治 組長	1.實驗使用木種，日本柳杉？。 2.接合部鐵件變成是導熱的來源，遮蓋或阻隔方面國外做法如何？	1.採用日本柳杉 2.針對接合部露出鐵件的遮蓋方式，國外施作方式與本研究相近，抑或將整個接合部或木造部分以防火材料遮蓋

附錄三、 期中及期末審查會議記錄

期中審查會議記錄

	委員意見/建議	研究團隊回應
王教授 松永	集成梁名稱請統一改為集成材梁	集成梁依審查意見改為集成材梁
	P21鋼柱為 BCR295斷面250×9方型鋼管柱正確尺寸為何?	斷面尺寸為250x250mm、厚度9mm 的方型鋼管柱
	P33.圖3-22遮蓋 T 型鋼片兩側各3cm 厚木材太薄，因依炭化速率柳杉集成材約0.8mm/min，因此其厚度須為約5cm(1hr)，另外被覆木材長×寬無需增大	接合部兩側集成材梁對於連接件遮蓋僅有3公分，防護效果確實有限，但若再增加厚度會材積會增加不少，因此在取得木材用量以及連接件傳遞應力需求的鋼板面積以及遮蓋需求等條件的平衡下，本設計最大能夠取得3公分的遮蓋厚度，曾參考日本數個設計案例，其遮蓋厚度也是類似的尺寸，故以此設計試體
	P.36由下向上5行，連接件中央部位溫度約為270°C，已達木材引燃溫度，但要燃燒需有空氣(O ₂)，在木材內部若沒空隙是沒有空氣也不會燃燒	相關文句已修正，謝謝指教。
	防火漆塗付後是否會劣化的情形?但若干年需再進行塗付，否則效果會消失或下降?	目前尚未有市面上防火漆塗劣化相關資料，無法明確了解多年後的性能。
林教授 慶元	欲突破高度，兩小時/三小時時效資料須建立，是否列優先課題，建議討論	此為接下來的重要課題，將依所內規劃將來探討相關議題。
	相應於炭縮行為，接合面縫使用膨脹性防火材是否有利，建議探討	防火漆噴塗位置在鋼柱表面，木梁內側鋼板不噴塗，但是在木梁與鋼柱接觸面可能會有防火漆膨脹而填塞部分炭縮空間，但因為膨脹後有大量孔隙在防火材內，其結構上強度不高，但可能有進一步防止火苗或高溫從此處深入功效。

曾教授 俊達	本項「集成材(GLT)應用於複合構造之接合部防火性能評估及設計方法建立」研究報告研究背景、研究目的與研究方法以及進行步驟與相關耐火性能試驗規劃，包括：防火實驗設備、試體規劃、試體組裝、試驗結果說明與分析品質簡明易讀，報告品質論述具體可嘉	謝謝委員指教
	唯本研究案於「集成材(GLT)應用於複合構造之接合部防火性能評估及設計方法建立」之部分是否能達成研究單位所託付之目標，仍待期中後續研究之具體成果。	將依合約規定提供相符的研究成果
林教授 法勤	報告中對試驗用的 GLT 基本性質描述不足，只有斷面性質、尺寸，應有集成元描述，膠、成品平均密度等資料	將對相關資料進行補充。
蘇建築 師鴻奇	因應接合板與裸栓等鐵件，傳熱(500°C以下)所產生木材構件接合部位的燃燒炭化，可考慮木構件接合部位塗佈耐燃性塗料	未來可考慮此施作方式的相關研究
	螺栓位置其深度升溫明顯不同，建議提出螺栓設計位置建議值	將依照實驗結果建議連接件佈設位置，以達到較佳耐火效果。
	實驗過程20分鐘有高溫突昇情況可進一步探討	可能為高溫竄入埋設熱電偶孔道使得梁內部數個熱電偶溫度同時上升。
鄭建築 師明裕	建議可以考量建築物於地震或漏水因熱漲冷縮之因，導致接合部有鬆脫產生縫隙，是否會影響其耐火能力	接合部因為地震等原因擴孔或乾縮等導致孔隙變大，或者木梁因管道需求開孔等原因造成的耐火性能疑慮，是使用以及實務上會面臨的問題，本年度計畫因為時程有限，未來有機會將透過試驗探討此部分的影響，供業界施工參考
	建議木梁若有開孔，是否會影響其耐火性能	已於上方一併回應。
	不同之梁柱接頭形式，是否會影響其結構力及耐火能力	不同接合形式、金屬件露出狀態都會影響耐火性能以及結構強度
社團法	試體規劃依目前國內的適用方式可能需	本研究內採用的接合部形式主要參照國內

人台灣 木建築 產業研 究院協 會 徐 技師宇 亮	要符合未來應用可能，在撰寫方式上可能要將此次實驗設計加以定義	現行常用型態加以設計，同時梁上方的樓板因計畫時程關係改材輕質混凝土版以模擬梁三面受火狀態。
財團法 人台灣 建築中 心 郭 經理全 豐	防火漆是受火後會膨脹，以達到防護的效果，但黏附性也是影響很大，故結合木構造後，可以在本案多加明確敘明噴覆方式及厚度	防火漆僅噴塗在鋼柱表面，噴覆方式及厚度及厚度將在文中補充說明。
雷聘用 研究員 明遠	實驗過程爐內溫度在第20分鐘前後有溫度升高現象，其原因可能是木材燃燒放熱現象所致，僅供研參	謝謝委員指教。
	報告書 P.37圖3-30，GLT 梁斷面溫度變化在第40分鐘 B5測點突然上升與其他測點不同，其原因請補充敘明	可能為高溫竄入埋設熱電偶孔道使得梁內部數個熱電偶溫度同時上升。
	測試後金屬繫件建請觀察評估火燒後變化情形(含強度)	將對金屬件進行強度試驗
	接合部金屬繫件型式種類，建議有專節介紹說明	將在文中補充專節說明
王組長 順治	有關本案研究集成梁名稱請統一改為集成材梁	遵照辦理。

期末審查會議紀錄

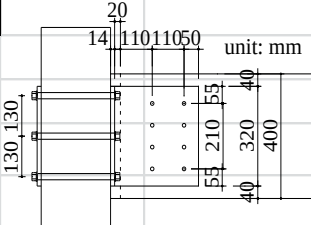
	委員評選意見	廠商回應
王教授 松永	集成材梁與柱接合，早期以榫接為主，但近年為考慮木材之循環，未來建築物解體回收性，已就構材之接頭，先使用 NE ROUTA 進行預製加工，並採用金屬鐵件內藏在構建內部，不但可防火害，且拆解回收達成循環之目的。	感謝委員指教。
	依報告鋼柱焊接連接金屬板可提升連接件與柱的接合強度，使得集成材梁與鋼柱接合部試體強度及勁度相較於集成材梁柱接合部大幅度提升。而若能將連接件埋入集成材梁之內部是否應更能防止受到火災。	根據實驗成果，接合部鐵件埋入集成材梁內部可降低鐵件傳遞高熱至木材的機會，進而減少炭化深度範圍。
陳教授 啟仁	本案接合部試體採木柱及採鋼柱時，在實際上，接合部應有所不同(因撓曲行為時，兩端力矩行為所致)建議可補充討論。	木構接合部接合形式依抵抗剪力為主或是可抗彎矩等的設計而會有不同形式，兩種型式接合部有不同的摩擦栓排列方式以及接合五金的形式，本研究依目前實務常用的抗剪力為主的接合形式設計試體，此部分將在報告書中註明其特性以避免讀者誤解。
	接合部型式於不同規範中有不同之設計方式，建議補充文獻，避免於實務上此細部設計被誤解為唯一標準工法。	同上說明。
曾教授 俊達	本項「集成材(GLT)應用於複合構造之接合部防火性能評估及設計方法建立」研究報告，包括：研究背景目的與研究進行步驟、相關耐火性能試驗規劃、實驗設備、試體規劃組裝、試驗結果說明分析報告論述具體。	感謝委員肯定。
	研究進度及完成工作項目檢討論述符合研究成果需求。	感謝委員肯定。

	研究具體提供發展集成材(GLT)應用於複合構造接合部防火性能評估及設計方法與技術應用上之參考。	感謝委員肯定。
林教授 法勤	摩擦栓造成孔的碳化，形成擴孔，孔徑的碳化速度或量是否有量測?	將在成果報告中增加摩擦栓孔炭化範圍(擴孔情形)，同時提供火害試體以及健全試體剛度數值並討論衰減情形。
	因為有估算接合部彎矩，實驗中的半剛性接合效率約為多少?火害實驗中是否會改變?	同上說明。
蘇建築 師鴻奇	實驗方法若依據 CNS 12514 系列進行，建議增加防火時效的判定與分析(例如圖表加入防火時效係數)。	本研究的試體係兩端透過梁柱接合部與柱相接的集成材梁試體，與 CNS 12514 中簡支梁測試方式有所不同，基於提供實務參考目的，將依照建議參照標準試驗的精神，增加防火時效相關分析內容。
	碳化深度顯示 L0、L1、L2 有超過 60mm 的規定，超出木構造規範規定，應建議如何改善於設計與施工做因應。	試驗中接合部側邊以及底邊炭化深度均大於規範值，因此接合部若僅依規範值設計構件斷面尺寸，將會高估設計剩餘強度，因此接合部與規範值炭化深度比例將會列於成果報告書中，並提供設計上建議以供實務參考。
	格式補正(摘要、結論、建議)。	已補正，謝謝指教。
周建築 師智中	為增加於「木構造建築物防火設計規範」集成材(GLT)梁柱接合部除鋼柱外，RC 接合亦請考慮，持續辦理。	RC 與木構接合部中，混凝土應較鋼結構能夠提供連接件較好的高溫防護，考量接合形式多樣，未來或可針對此類型接合部進行研究。
	集成材接合部火害後碳化厚度的成果，是否訂定出具一小時防火時效的集成材斷面積尺寸?	本研究測試的接合部試體炭化深度將整理於成果報告書中，未來可參照此實驗數據設計接合部構件的斷面尺寸。
內政部 國土管 理署	研究報告結論4有部分數據漏列，請檢視是否要補上。	已補正，感謝委員指教。
	請依據研究結論綜整後，提出若干建議。	建議已補列於報告書內。
中華民國 全國	研究成果非常肯定且仔細，研究接合部接合情形並有實際驗證，對未來具有參考價	感謝委員肯定。

建 築 師 公 會 蔡 建 築 師仁毅	值。	
王 組 長 順 治	本案鋼柱與木梁接合部研究，實驗發現五金接合貫穿碳化問題，應於報告中敘明因應措施。	報告書將會根據實驗成果如五金貫穿周邊木材炭化問題等，提供接合部耐火設計建議。

附錄四、 接合部設計

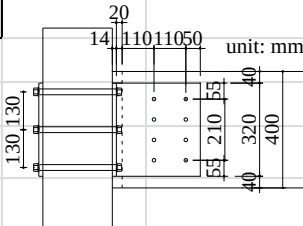
第一、二組試體接合部設計

接合形式:	兩面剪斷中間鋼板插入			
荷重角度	90			
使用環境	III	M20 col. Bolt		
接合具	Dowel			
	徑 d			
	14	有效長 l (mm)	187	
	鋼板厚 (mm)	9		
木材	樹種	柳杉		
	強度等級	E75-F240		
	斷面	200x400	mm	
強度	鋼板 F	235	N/mm ²	
	⊥Fe	12.7	N/mm ²	
	r=F/Fe	24.2		
	C/降伏模態	0.54	III	
	⊥Py	13.6	kN	
接合部	接合種別	JB		
	jKr	0.9	l/d	13.4
容許剪力強度(kN)	單一接合 Pa	整體接合 Pa	需要數量	4.7
長期(jKd=1.1)	5.0	33.1	採用數量	8
中長期(jKd=1.43)	6.5	43.1	P _{uj} =	100.4
中短期(jKd=1.6)	7.3	48.2	P _{uw1} =	119.7
短期(jKd=2.0)	9.1	60.2	P _{uw2} =	107.7
最大剪力 (Q)	23.6		P _{u0} =	100.4
剪力強度檢核	Pa>Q ?	OK	極限狀態	不割裂-剪壞
鋼板長期容許強度	P _{By} =f _l *n*d*t=	296.1	kN	

第一、二組試體梁斷面檢核

梁斷面設計			長時斷面	火害後斷面	
斷面、尺寸等	斷面尺寸	寬度	200	120	mm
		深度	400	360	mm
	斷面積	$A (A')=$	80000	43200	mm^2
	斷面係數	$Z (Z')=$	5333333.33	2592000	mm^3
	慣性矩	$I (I')=$	1066666667	466560000	mm^4
	淨跨距	$L=$	5		m
	荷重	$w (Dl+LL)=$	9.84		N/mm^2
撓度	初期容許撓度	$L/250=$	19.2	--	mm
	最大撓度	$5wl^4/384EI =$	8.51	--	mm
	檢核	容許 > 最大 ?	OK	--	
彎曲應力檢核	材種/等級	柳杉E75-F240			
	彎曲基準應力	$F_b=$	24	--	N/mm^2
	長期容許彎曲應力	$_L f_b = 1.1/3 F_b$	8.8	--	N/mm^2
	短期容許彎曲應力	$_s f_b = 2/3 F_b$	--	16	N/mm^2
	最大彎矩	$M=wL^2/8=$	30761.7		$\text{N}\cdot\text{m}$
	最大彎曲應力	$M/Z=$	5.77	11.87	N/mm^2
	容許應力檢核	容許 > 最大 ?	OK	OK	
剪應力檢核	剪斷基準應力	$F_s=$	2.7	--	N/mm^2
	長期容許剪應力	$_L f_s = 1.1/3 F_s$	0.99	--	N/mm^2
	短期容許剪應力	$_s f_s = 2/3 F_s$	--	1.8	N/mm^2
	最大剪力	$Q=wL/2=$	23625		N
	最大剪應力	$1.5Q/A=$	0.30	0.55	N/mm^2
	容許應力檢核	容許 > 最大 ?	OK	OK	

第三組試體接合部設計

梁端接合形式:	兩面剪斷中間鋼板插入			
荷重角度	90			
使用環境	III	M20 col. Bolt		
接合具	Dowel			
	徑 d			
	16	有效長 l (mm)	187	
	鋼板厚 (mm)	9		
木材	樹種	花旗松		
	強度等級	E105-F300		
	斷面	200x400	mm	
強度	鋼板 F	235	N/mm^2	
	$\perp\text{Fe}$	12.7	N/mm^2	
	$r=F/\text{Fe}$	18.5		
	C/降伏模態	0.54	III	
	$\perp\text{Py}$	20.4	kN	
接合部	接合種別	JB		
	jKr	0.9	l/d	11.7
容許剪力強度(kN)	單一接合 Pa	整體接合 Pa	需要數量	3.2
長期(jKd=1.1)	7.5	37.1	採用數量	6
中長期(jKd=1.43)	9.7	48.3	$P_{uj} =$	112.6
中短期(jKd=1.6)	10.9	54.0	$P_{uw1} =$	155.5
短期(jKd=2.0)	13.6	67.5	$P_{uw2} =$	134.6
最大剪力 (Q)	23.6		$P_{u0} =$	112.6
剪力強度檢核	$P_a > Q ?$	OK	極限狀態	不割裂-剪壞
鋼板長期容許強度	$P_{By} = f_l * n * d * t =$	253.8	kN	

第三組試體梁斷面檢核

梁斷面設計			長時斷面	火害後斷面	
斷面、尺寸等	斷面尺寸	寬度	200	120	mm
		深度	400	360	mm
	斷面積	$A (A')=$	80000	43200	mm^2
	斷面係數	$Z (Z')=$	5333333.33	2592000	mm^3
	慣性矩	$I (I')=$	1066666667	466560000	mm^4
	淨跨距	$L=$	5		m
	荷重	$w (Dl+LL)=$	9.84		N/mm^2
撓度	初期容許撓度	$L/250=$	19.2	--	mm
	最大撓度	$5wl^4/384EI =$	6.08	--	mm
	檢核	容許 > 最大 ?	OK	--	
彎曲應力檢核	材種/等級	花旗松E105-F300			
	彎曲基準應力	$F_b=$	30	--	N/mm^2
	長期容許彎曲應力	$_L f_b = 1.1/3 F_b$	11	--	N/mm^2
	短期容許彎曲應力	$_s f_b = 2/3 F_b$	--	20	N/mm^2
	最大彎矩	$M=wL^2/8=$	30761.7		$\text{N}\cdot\text{m}$
	最大彎曲應力	$M/Z=$	5.77	11.87	N/mm^2
	容許應力檢核	容許 > 最大 ?	OK	OK	
剪應力檢核	剪斷基準應力	$F_s=$	3.6	--	N/mm^2
	長期容許剪應力	$_L f_s = 1.1/3 F_s$	1.32	--	N/mm^2
	短期容許剪應力	$_s f_s = 2/3 F_s$	--	2.4	N/mm^2
	最大剪力	$Q=wL/2=$	23625		N
	最大剪應力	$1.5Q/A=$	0.30	0.55	N/mm^2
	容許應力檢核	容許 > 最大 ?	OK	OK	

第四組試體梁斷面檢核

梁斷面設計			長時斷面	火害後斷面	
斷面、尺寸等	斷面尺寸	寬度	200	120	mm
		深度	400	360	mm
	斷面積	$A (A')=$	80000	43200	mm^2
	斷面係數	$Z (Z')=$	5333333.33	2592000	mm^3
	慣性矩	$I (I')=$	1066666667	466560000	mm^4
	淨跨距	$L=$	5		m
	荷重	$w (Dl+LL)=$	9.84		N/mm^2
撓度	初期容許撓度	$L/250=$	19.2	--	mm
	最大撓度	$5wl^4/384EI =$	6.08	--	mm
	檢核	容許 > 最大 ?	OK	--	
彎曲應力檢核	材種/等級	花旗松E105-F300			
	彎曲基準應力	$F_b=$	30	--	N/mm^2
	長期容許彎曲應力	$_L f_b = 1.1/3 F_b$	11	--	N/mm^2
	短期容許彎曲應力	$_s f_b = 2/3 F_b$	--	20	N/mm^2
	最大彎矩	$M=wL^2/8=$	30761.7		$\text{N}\cdot\text{m}$
	最大彎曲應力	$M/Z=$	5.77	11.87	N/mm^2
	容許應力檢核	容許 > 最大 ?	OK	OK	
剪應力檢核	剪斷基準應力	$F_s=$	3.6	--	N/mm^2
	長期容許剪應力	$_L f_s = 1.1/3 F_s$	1.32	--	N/mm^2
	短期容許剪應力	$_s f_s = 2/3 F_s$	--	2.4	N/mm^2
	最大剪力	$Q=wL/2=$	23625		N
	最大剪應力	$1.5Q/A=$	0.30	0.55	N/mm^2
	容許應力檢核	容許 > 最大 ?	OK	OK	

参考書目

1. 天 野 耕 二, 加 用 千 裕: マ テ リ ア ル フ ロ ー 分 析 に 基 づ い た 建 築 分 野 に お
ける木材の炭素収支について, 環境システム論文集, Vol. 32, pp. 57-63, 2004
2. 恒次祐子, 松原恵理, 杉山真樹, 木質居住環境が人間にもたらす影響の評価手法, 木材学
会誌 Vol. 63, No. 1, pp. 1-13, 2017
3. Frank Lam, m wrede, c yao, Jianzhong Gu, Moment resistance of bolted timber connections with
perpendicular to grain reinforcements, World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, Japan,
July, 2008
4. Kei Sawata, Takanobu Sasaki, Shuichi Doi & Yasuo Iijima, Effect of decay on shear performance
of dowel-type timber joints, Journal of Wood Science volume 54, pp. 356-361, 2008
5. 木構造建築物設計及施工技術規範, 内政部營建署
6. 構造防火技術規範與集成材炭化特性之研究, 内政部建築研究所自行研究報告, 民國94年
7. 菊地毅之, 四元順也, 河原林 風太, 石田雄大, 戸塚 真里奈, 平島岳夫, 構造用集成材フ
レームの耐火性能に関する実験的研究(その1): 1 時間以上の標準火災加熱を受ける柱
梁接合部の温度と炭化性状, 日本建築学会構造系論文集 第87巻 第802号, 1300-1311,
2022年
8. Behavior of dowelled and bolted steel-to-timber connections exposed to fire, Engineering
Structures, 39, pp. 116-125, 2012
9. Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General -Structural fire design
10. 日本集成材工業協同組合、準耐火構造(集成材建築物)における接合部の耐火設計の手
引き、木造住宅・木造建築物等の整備促進に関する技術基盤強化事業、国土交通省、平成
22年
11. 抱 憲誓, 佐々木直幸, 宮本圭, 西村光太, 耐火集成材と鉄骨部材接合部の耐火性能,
日本建築学会技術報告集 第27 巻 第67 号, 1291-1296, 2021
12. 準耐火構造(集成材建築物)における接合部の防火設計の手引き
13. 遠藤俊貴, 高木次郎, 鈴木淳一, 大宮喜文, 野秋政希, 見波 進, 荒木慶一, 下錦田聡志,
“高力ボルトで一体化した鋼木複合断面部材の準耐火性能評価実験”, 日本建築学会技術
報告集 第17 巻 第36 号, 543-547, 2011 年6 月
14. 大橋 宏和, 同 永盛 洋樹, 長岡 勉, 同 大野 正人, 五十嵐 信也, 遊佐 秀逸, 吉川 利
文, 金城 仁, “耐火木造部材の耐火性能に関する研究その3 柱梁接合部の載荷加熱実験”,
日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 2013 年 8 月

15. Aaron O. Akotuah, Sabah G. Ali, Jeffrey Erochko, Xia Zhang, George V. Hadjisophocleous, “STUDY OF THE FIRE PERFORMANCE OF HYBRID STEEL-TIMBER CONNECTIONS WITH FULL-SCALE TESTS AND FINITE ELEMENT MODELLING”, Proceedings of the International Conference in Dubrovnik, 15-16 October 2015